

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik

der Ludwig-Maximilians-Universität München

Direktor: Prof. Dr. D. Edelhoff

**Einfluß verschiedener intraoraler Reparaturmethoden auf die
Reparaturfestigkeit eines industriell polymerisierten CAD/CAM-
Komposites**

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnheilkunde
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Andreas Krawczuk
aus München

2017

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät

der Universität München

Berichterstatlerin: PD Dr. Dipl.-Ing. (FH) Bogna Stawarczyk, M.Sc.

Mitberichterstatler: Prof. Dr. Jürgen Manhart
PD Dr. Dr. Gerson Mast

Mitbetreuung durch den
promovierten Mitarbeiter apl. Prof. Dr. Dipl.-Ing. Nicoleta Ilie

Dekan: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

Tag der mündlichen Prüfung: 07.12.2017

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Literaturübersicht.....	3
2.1 CAD/CAM-Komposite.....	3
2.2 Abrasionbeständigkeit von CAD/CAM-Kompositen im Vergleich zu Glaskeramik.....	5
2.3 Reparatur von CAD/CAM-Kompositen.....	7
2.4 Oberflächenvorbehandlung der Substratoberfläche.....	7
2.5 Verbundsysteme.....	12
3. Fragestellung, Ziele und Hypothese.....	15
4. Material und Methode.....	16
4.1 Materialien.....	16
4.2 Methode.....	19
5. Ergebnisse.....	28
6. Diskussion.....	43
6.1 Diskussion von Material und Methode.....	44
6.2 Diskussion der Ergebnisse.....	49
7. Schlußfolgerungen.....	53
8. Zusammenfassung.....	54
9. Literaturverzeichnis.....	55
10. Abkürzungsverzeichnis.....	63
11. Curriculum Vitae.....	64
12. Danksagung.....	65

1. Einleitung

Seit ihrer Einführung in die Zahnmedizin, erfuhr die dentale CAD/CAM-Technologie einen enormen Aufschwung. Hierbei steht CAD/CAM für „computer-aided-design“ und „computer-aided-manufacturing“. Dem Trend der „metallfreien“ Zahnmedizin folgend, steigt die Nachfrage zahnfarbener Materialien. Die Palette der verwendbaren Materialien in der dentalen CAD/CAM-Technologie umfasst neben verschiedenen Metallen auch die Verwendung von Keramiken und von Kunststoffen. Als Alternative zu den Keramiken in der CAD/CAM-Technologie sind in letzter Zeit industriell hergestellte Kompositblöcke auf den Markt gebracht worden. Diese sind für temporäre Versorgungen sowie als Langzeitversorgung von Einzelzähnen einsetzbar [1]. Anders als konventionell polymerisierte Komposite, die bisher als direktes Provisorium vom Zahnarzt sofort hergestellt wurden, oder vom Zahntechniker im Labor gefertigt wurden, besitzen die unter standardisierten Bedingungen unter hohem Druck und hoher Temperatur polymerisierten Kompositblöcke bessere Materialeigenschaften als konventionell polymerisierte Komposite [2-3]. Zusätzlich zu den besseren mechanischen Eigenschaften weisen die CAD/CAM-Komposite eine höhere Abrasionsbeständigkeit im Vergleich zu konventionell polymerisierten Kompositen auf [4]. Weiterhin verursachen CAD/CAM-Komposite einen geringeren Verschleiß des Schmelzantagonisten als Restaurationen aus Glaskeramik [5-7], jedoch ist der Verschleiß des CAD/CAM-Komposites selbst sehr viel höher als der Verschleiß der Glaskeramik [4]. Einzelzahnrestaurationen aus CAD/CAM-Kompositen zeigten nach drei Jahren Funktion geringere Überlebensraten als vollkeramische Einzelzahnrestaurationen, was auf die geringere Verschleißresistenz der CAD/CAM-Komposite zurückgeführt wurde [8]. Da die CAD/CAM-Komposite vom Hersteller als Material für definitive Einzelzahnrestaurationen vorgesehen sind, stellt sich die Frage ob es eine effiziente Methode gibt, die es ermöglicht die CAD/CAM-Komposite intraoral zu reparieren, oder ob sie aufgrund ihres Verschleißes von einer zusätzlichen Schicht aus Komposit als Schutz profitieren.

Durch die industrielle Polymerisation der Komposite unter hohem Druck und hoher Temperatur, haben diese eine hohe Konversionsrate und somit kaum verbliebenes Monomer [9]. Um einen suffizienten Verbund eines Reparaturkomposite zum CAD/CAM-Komposit herzustellen bedarf es einer Oberflächenvorbehandlung der Substratoberfläche und der Applikation eines Haftvermittlers [10-13]. Dies entspricht im wesentlichen dem Reparaturprotokoll von herkömmlichen, konventionell polymerisierten Kompositen, nämlich der Vorbehandlung der Oberfläche durch Korundstrahlen oder rotierende Instrumente, die Anwendung eines Haftvermittlers sowie die Verwendung eines Komposites als Reparaturmaterial [14]. Um die Fehleranfälligkeit bei der

Applikation der Haftvermittler zu verringern, wurden vor kurzem Universaladhäsivsysteme, mit weniger Applikationsschritten, auf den Markt gebracht. Sie beinhalten in ihrer chemischen Zusammensetzung neben Methacrylatmonomeren zusätzlich Silan- oder Phosphatmonomere, die es ihnen erlauben einen Verbund mit Metall-, Silikatkeramik- oder Zirkonrestaurationen herzustellen [15].

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der in-vitro Reparatur eines künstlich gealterten CAD/CAM-Komposites. Ähnlich der Reparatur von Kompositrestaurationen [11] erfordert dies eine Behandlung der Substratoberfläche, die Anwendung eines Verbundsystems sowie die Applikation eines Komposites [16]. Als Oberflächenvorbehandlungen wurden diejenigen ausgewählt, die die besten Ergebnisse lieferten. Dies waren das Strahlen der Substratoberfläche mit Korund und die mechanische Aufrauhung mit einem rotierenden Schleifkörper [14].

Ziel dieser Arbeit war es den Einfluß verschiedener Reparaturkits inklusive Universaladhäsive auf die Zughaftfestigkeit der Reparatur zu bestimmen. Dabei wurden vier unterschiedliche Haftvermittler mit und ohne vorherige mechanische Oberflächenvorbehandlung verwendet. Die Reparatur erfolgte mit zwei unterschiedlichen Kompositen, die sich in ihrem Elastizitätsmodul unterschieden, verwendet. Da es klinisch zu einer Kontamination der vorbehandelten Substratoberfläche mit Wasser oder Phosphorsäure kommen kann, war es weiterhin Ziel dieser Arbeit den Einfluß des Kontaktes der Substratoberfläche mit Wasser oder Phosphorsäure auf die Reparaturfestigkeit zu untersuchen.

Das Hauptaugenmerk der Arbeit lag darauf zu ergründen ob ein verlässlicher Verbund zwischen dem CAD/CAM-Komposit und den Reparaturkompositen zu erreichen ist und wie sich die einzelnen Schritte des Reparaturprotokolls auf den Verbund auswirken.

2. Literaturübersicht

2.1. CAD/CAM-Komposite

Das Interesse zahnärztliche Restaurationen mithilfe der CAD/CAM-Technologie herzustellen wächst weltweit [6]. Die Vorteile von CAD/CAM-gefertigten Restaurationen sind der mögliche Einsatz von neuen Materialien, reduzierte Laborzeit und -kosten, sowie die konstante Qualität [17]. Die Anforderungen, die an ein CAD/CAM-Material gestellt werden, sind die schnelle Verarbeitung, das unbeschädigte Überstehen des Schleifprozesses sowie die einfache Finierbarkeit [6]. Die Verwendung von CAD/CAM-generierten Restaurationen aus Kompositen als qualitative Langzeitversorgung kommt in letzter Zeit immer mehr in Mode [18]. Die Herstellung und das Design der Restauration kann einerseits im zahntechnischen Labor oder direkt in der zahnärztlichen Praxis, mit dem Vorteil der Zeitersparnis und dem Wegfallen eines direkt gefertigten Provisoriums, erfolgen [2].

CAD/CAM-gefertigte Kompositrestaurationen erfüllen hohe ästhetische Ansprüche und haben eine große Indikationsbreite [1] [19]. Die, im Vergleich zu konventionell polymerisierten direkten und indirekten Kompositen, signifikant besseren mechanischen Eigenschaften können durch die industriell standardisierte Polymerisation der CAD/CAM-Kompositrohlinge unter hohem Druck und hoher Temperatur erreicht werden [2]. Hatte bei konventionell polymerisierten Kompositen der Behandler noch einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf die Qualität des verarbeiteten Materials so ist dies bei den vorgefertigten Rohlingen nicht der Fall [20]. Es wurden weniger Verfärbungen [18] und eine höhere Abrasionsbeständigkeit im Vergleich zu konventionell polymerisierten Kompositen festgestellt [21]. Besonders bei dünnen Restaurationen zeigten jene aus CAD/CAM-Kompositen gefertigten Restaurationen eine höhere Frakturresistenz als Restaurationen aus Glaskeramik [4] [22].

Verglichen mit Keramiken die bei dem Schleifprozess in CAD/CAM-Maschinen oftmals Frakturen erleiden sind die industriell polymerisierten CAD/CAM-Komposite widerstandsfähiger, was sie besonders gut verarbeitbar macht [23].

Neu auf dem Markt ist das CAD/CAM-Komposit LAVA Ultimate. Dieses Material enthält Nanomere (Silizium mit 20 nm Durchmesser und Zirkondioxid mit 4-11 nm Durchmesser) und Nanocluster Füller mit einem Gesamtfülleranteil von circa 80 Gewichts% [24]. Die Nanopartikel werden mit einem Silan-Haftvermittler mithilfe einer firmeneigenen Methode bearbeitet. Dieses

funktionelle Silan schafft einen chemischen Verbund sowohl zu den Füllern als auch zur Kunststoffmatrix [24].

Der Wunsch nach einem Komposit mit gesteigerten mechanischen Eigenschaften für den Einsatz in der CAD/CAM-Technologie kann durch die industrielle Polymerisation unter hohem Druck und hoher Temperatur erreicht werden [25].

In Verbindung mit der Technologie eines interpenetrierenden Netzwerks konnten bessere mechanische Eigenschaften erreicht werden, als bei konventionell polymerisierten Kompositen, die die Verwendung der industriell polymerisierten Kompositblöcke für die CAD/CAM-Technologie legitimieren [25-26]. Dieses Verfahren der Polymerisation zielt darauf ab, die intermolekularen Distanzen und das freie Volumen eines Monomergemisches zu reduzieren [25]. Nguyen et al. kamen zu dem Ergebnis, dass Komposite, die nach dem oben beschriebenen Verfahren polymerisiert wurden, signifikant bessere mechanische Eigenschaften als konventionell polymerisierte Komposite aufweisen und demzufolge für die Verwendung in der CAD/CAM-Technologie geeignet sind [26].

Eine Studie verglich die Belastbarkeit von dreigliedrigen Brücken, die aus einem industriell polymerisierten Komposit hergestellt wurden mit solchen die aus einem Komposit hergestellt wurden, das auf konventionelle Weise polymerisiert wurde, wobei die Brücken aus dem industriell polymerisierten CAD/CAM-Komposit eine höhere Belastbarkeit aufwiesen [3].

In einer anderen Studie erreichten dreigliedrige Brücken, die aus einem CAD/CAM-Komposit gefertigt wurden, eine höhere Bruchlast als dreigliedrige Brücken die aus einem konventionell polymerisierten Komposit hergestellt wurden [2].

Auch nach künstlicher Alterung für bis zu 180 Tage in 37 ° Celsius (°C) warmen Wasser oder nach Durchlaufen von 1,2 Millionen Kauzyklen, zeigten die zahnärztlichen Restaurationen aus CAD/CAM-Komposit bessere mechanische Eigenschaften verglichen mit jenen, welche aus konventionell polymerisierten Komposit hergestellt wurden [27]. Es kann davon ausgegangen werden, dass die 1,2 Millionen Kauzyklen einer in vivo Tragezeit von fünf Jahren entsprechen [28]. Vorteile der Verwendung von CAD/CAM-Kompositen anstelle von Keramiken können in der höheren Belastbarkeit [25] und in dem geringeren Verschleiß am antagonistischen Schmelz gesehen werden [5].

Es kann also davon ausgegangen werden, dass industriell polymerisierte CAD/CAM-Komposite als Material für zahnärztliche Langzeitrestaurationen verwendet werden können und sich die Entwicklung von ästhetischen Restaurationsmaterialien in der Zahnheilkunde mehr in die Richtung der Komposite bewegt [18].

2.2 Abrasionsbeständigkeit im Vergleich zu Glaskeramik

Verschleiß wird definiert als die ultimative Konsequenz der Interaktion zweier Oberflächen, welche in einem Verlust des einen und/oder des anderen Materials resultiert [29]. In der Zahnmedizin wird der Begriff Verschleiß für den Verlust der Oberfläche eines Restaurationsmaterials und/oder seines Antagonisten verwendet [29]. Der Verschleiß von Zahnhartsubstanzen ist ein komplexer Prozeß, der durch die Dicke und die Härte des Schmelzes, der Kaufunktion in Kombination mit Parafunktionen und dem abrasiven Einfluß der Speisen und den Antagonisten beeinflusst wird [30]. Zum Verschleiß von Schmelz und Dentin tragen mehrere Faktoren wie beispielsweise der Okklusalkontakt mit den Antagonisten, die Nahrungs- und Zahnpastenzusammensetzung, Säureeinwirkungen und weitere exogene und endogene Ursachen bei [31]. Die jährliche Verlustrate von Schmelz im Molarenbereich wird mit 29 µm angegeben, wobei Bruxismus und Parafunktionen jedoch zu einem noch höheren Verschleiß beitragen können [32].

Analog zum Verschleiß von Dentin und Schmelz kommt es auch bei zahnärztlichen Restaurationen zu einem Verschleiß, welcher stark von der Auswahl des Materials abhängt [31]. Zu differenzieren ist der Verschleiß am Werkstoff selbst, sowie der Verschleiß der Oberfläche seines Antagonisten wobei das ideale Restaurationsmaterial also verschleißresistent sein sollte und gleichzeitig keinen Verschleiß an seinem Antagonisten verursachen sollte [31]. Bereits 1971 stellten Monasky et al. fest, dass der Verschleiß an natürlichem Schmelz, verursacht durch antagonistische Keramikrestaurationen, in besonderem Maße von der Rauigkeit und der Integrität der Keramikoberfläche abhängt [33].

Wird die Integrität der Keramikoberfläche gestört, so kommt es zu einer Herauslösung von Partikeln, die der Glaskeramik zur Verbesserung ihrer mechanischen Eigenschaften zugesetzt worden sind. Dieses Aufräumen der Oberfläche, mit einhergehender Exposition von kristallinen Phasen wie Leuciten, kann während den Verschleißtests beobachtet werden. Parallel zum fortlaufenden Verschleißprozeß verursacht die aufgerauhte Keramik einen immer höheren Verschleiß der antagonistischen Oberfläche [34].

Krejci et al. [35] verglichen in einer Studie den Verschleiß von natürlichem Schmelz, der durch Inlays aus Glaskeramik und Feldspatkeramik verursacht wurde. Alle getesteten keramischen Materialien erwiesen sich als hochgradig verschleißresistent. Dabei zeigte sich, dass der Verschleiß von der Härte und Zusammensetzung der Oberfläche der Keramikrestauration abhing. Je härter die Oberfläche der Keramik war und je rauher die Oberfläche, desto größer war der im antagonistischen Schmelz verursachte Verschleiß. Dieser bewegte sich im Bereich von $74,6 \pm 32,9$ µm für die

Glaskeramik, wobei bei dem hier verwendeten in-vitro Test eine klinische Tragedauer von fünf Jahren simuliert wurde [35].

Zu ähnlichen Ergebnissen kamen Elmaria et al. in einer Studie von 2006. Hier wurde das Verschleißverhalten von Schmelz untersucht, welcher gegenüber unterschiedlichen zahnärztlichen Restaurationen lag. Den größten Verschleiß von Schmelz konnte bei der Glaskeramik IPS Empress beobachten werden [36]. Auch in der Studie von Ramp et al. stellte sich die Glaskeramik IPS Empress als das Material mit dem höchsten Verschleiß des Antagonisten heraus [37]. Jagger et al. untersuchten die Abhängigkeit des Verschleißes von antagonistischem Schmelz und der Art der Oberflächenbearbeitung der Keramik, nachdem bei dieser die Okklusion eingestellt wurde. Es fand sich kein Unterschied zwischen glasierter und unglasierter Keramik. Der Verschleiß erwies sich bei beiden als ähnlich. Jedoch verursachte die abschließend polierte Keramikoberfläche wesentlich weniger Verschleiß am Antagonisten [38]. Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit den Untersuchungen von Stawarczyk et al. zur Abrasionsbeständigkeit von Glaskeramiken und CAD/CAM-Kompositen [4]. In dieser Studie wird der Oberflächenbeschaffenheit der Keramik, sowie deren Härte eine fundamentale Bedeutung an dem Verschleiß von Zahnhartsubstanzen zugemessen. Hier konnte in den Verschleißtests nicht nur eine Zunahme der Oberflächenrauigkeit, verbunden mit einem fortschreitenden höheren Verschleiß des Schmelzes beobachtet werden, sondern sogar Risse und Frakturen der antagonistischen Schmelzoberfläche. Weiterhin wurden in dieser Studie die Abrasionsbeständigkeiten von konventionell polymerisierten Kompositen und CAD/CAM-Kompositen untersucht. Fünf CAD/CAM-Komposite, ein manuell polymerisiertes Komposit sowie eine Glaskeramik wurden hinsichtlich ihrer Abrasionsbeständigkeit und dem von ihnen verursachten Verschleiß an der antagonistischen Schmelzoberfläche untersucht. Dabei wiesen alle industriell polymerisierten Komposite weniger Verschleiß, als das manuell polymerisierte Komposit auf. Die industriell polymerisierten Komposite zeigten einen höheren vertikalen Materialverlust und schnitten damit, bezüglich ihrer Abrasionsbeständigkeit, schlechter ab als die Glaskeramik (VITA Mark II, Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Deutschland) [4]. Zu ähnlichen Aussagen kamen Kunzelmann et al. in einer in-vitro Studie, bei der die Abrasionsbeständigkeit des CAD/CAM-Komposites Paradigm MZ100 (3M ESPE, Seefeld Deutschland) und der Glaskeramiken ProCAD und IPS Empress (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) untersucht wurden. Paradigm MZ100 zeigte den größten Materialverschleiß. Dieser war fast doppelt so hoch wie der der Keramikmaterialien. Das CAD/CAM-Komposit verursachte jedoch auch, ähnlich wie in der Studie von Stawarczyk et al. den geringsten Verschleiß am antagonistischen Schmelz [39].

2.3. Reparatur von CAD/CAM-Kompositen

Verglichen mit dem Verschleiß von Glaskeramiken ist der Verschleiß der CAD/CAM-Komposite selbst hoch [4]. Mit der Verwendung von CAD/CAM-Kompositen als Material für zahnärztliche Langzeitrestaurationen, stellt sich die Frage ob die CAD/CAM-Komposite von einer zusätzlichen Schicht aus Komposit als Schutz vor Verschleiß profitieren würden, beziehungsweise ob Restaurationen aus industriell polymerisierten CAD/CAM-Kompositen suffizient im Mund des Patienten repariert werden können.

Studien zum Verbund von Kompositen und CAD/CAM-Kompositen haben gezeigt, dass neben einer Oberflächenvorbehandlung die Applikation eines Haftvermittlers nötig ist [10-13].

Die Schaffung einer mikromechanischen Retention auf der Substratoberfläche, sowie der chemische Verbund zwischen der organischen Matrix des Substrates und des Reparaturmaterials sowie der chemische Verbund zwischen Füllerpartikeln des Ausgangsmaterials und dem Reparaturwerkstoff sind die drei Faktoren welche die Reparaturfestigkeit einer Kompositrestauration beeinflussen [40].

Im Folgenden wird auf die gängigsten Methoden, sowohl der Oberflächenvorbehandlung als auch der chemischen Oberflächenkonditionierung, welche eine Verbesserung der Reparaturfestigkeit mit sich bringen, eingegangen.

2.4 Oberflächenvorbehandlung der Substratoberfläche

In der Absicht die Reparatur von Kompositen zu optimieren, wurden unterschiedliche Reparaturprocedere beschrieben. Diese beinhalten verschiedene Verfahren der Oberflächenvorbehandlung und -konditionierung.

Die Oberfläche zahnärztlicher Kompositrestaurationen ist einer gewissen Alterung unterworfen. Dieser Alterungsprozess umfasst das Herauslösen bestimmter Komponenten, Wasseraufnahme in der Matrix und an der Schnittstelle zwischen Füllkörpern und Matrix, sowie den Verschleiß der Oberfläche, hervorgerufen durch den Verlust von Matrix und Füllkörpern [41].

Diese Degradation der Oberfläche hat sowohl auf die mechanischen Eigenschaften des Komposites als auch auf den Verbund zu dem Haftvermittler bei einer Reparatur, einen negativen Einfluß [42].

Eine Empfehlung wie viel Material bei einer Kompositreparatur im Rahmen der Oberflächenvorbehandlung entfernt werden müsste, um die Schicht der Degradation zu entfernen und die Stärke der Reparatur zu verbessern, gaben Yap et al., in deren Studie nach der Bewertung von Schnittbildern bei 600-facher Vergrößerung die Dimension der Degradationsschicht mit 5 bis 10 µm beziffert werden konnte [43].

Das Ziel der Oberflächenvorbehandlung ist folglich zum ersten die Entfernung der Degradationsschicht und andererseits mechanische Retentionen zu schaffen. Diese Forderungen können mit verschiedenen Maßnahmen erreicht werden, wobei grundsätzlich zwischen einer mechanischen und einer chemischen Oberflächenvorbehandlung differenziert werden kann [44].

Die direkte Schichtung des Reparaturkomposits, ohne vorherige Oberflächenvorbehandlung, auf eine gealterte Substratoberfläche, wird generell nicht empfohlen [40]. Durch die unvollständige Penetration des Reparaturkomposits in die Oberflächentopografie und die reduzierte Ausbildung kovalenter Bindungen, wird der Verbund von Substrat und Adhärend herabgesetzt [45-46].

Die Bearbeitung der Oberfläche mit Diamantschleifkörpern, Siliziumkarbidschleifpapier, das Korundstrahlen der Oberfläche mit Aluminiumoxid-Pulver oder silikatisiertem Aluminiumoxid-Pulver sowie die Anwendung von Flusssäure, Phosphorsäure, Hexafluoridokieselsäure, und das Reinigen der Oberfläche mit Aceton, Ethanol, Chloroform und Ethylacetat können alle unter dem Begriff der Oberflächenvorbehandlung eingereicht werden [14]. Sie werden im Folgenden genauer beleuchtet.

Mechanische Oberflächenvorbehandlung

Um den Verbund des Reparatursubstrates mit dem Reparaturmaterial zu erhöhen, bedarf es einer mechanischen Retention, die es dem Reparaturmaterial, beziehungsweise dem Haftvermittler, ermöglicht einen Verbund herzustellen [41]. Zusätzlich wird hierdurch die alterungsbedingte Degradationsschicht entfernt und eine bessere Benetzbarkeit der Oberfläche erreicht. Eine mechanische Oberflächenvorbehandlung kann makromechanischer, zum Beispiel durch das Anlegen von Unterschnitten und Retentionslöchern oder dem Anrauen der Oberfläche mit unterschiedlichen rotierenden Instrumenten, beziehungsweise mikromechanischer Natur sein. Das Ätzen der Substratoberfläche mit Flusssäure und die Anwendung von Korundstrahlgeräten werden der mikromechanischen Oberflächenvorbehandlung zugeordnet [41].

Die makromechanische Oberflächenvorbehandlung kann mit Diamantschleifern unterschiedlicher Körnung, Silizium- und Aluminiumoxidschleifern, Siliziumkarbidpapier oder anderen rotierenden Schleifkörpern erfolgen, wobei das Präparieren von Unterschnitten oder Retentionslöchern im Substrat die Gefahr der nicht vollständigen Ausfüllung derselben birgt, was zu Bereichen ungünstiger Stressentwicklung führen kann, welche den Reparaturerfolg herabsetzen [46]. In einer Studie von Shahdad et al. wurden schon Verbesserungen der Reparaturfestigkeit bei der alleinigen mechanischen Oberflächenvorbehandlung ohne Verwendung eines Haftvermittlers erreicht [47]. Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit der Studie von Brosh et al., bei der sich die höchsten

Reparaturfestigkeiten nach der Bearbeitung der Oberfläche mit einem Korundstein und anschließender Haftvermittlerapplikation ergaben [48]. In den Untersuchungen von Bonstein et al., in denen unterschiedliche Oberflächenvorbehandlungen, in Kombination mit Haftvermittlern und deren Einfluß auf die Kompositreparatur verglichen wurden, ergab sich die höchste Scherhaftfestigkeit bei den Substraten, die mit Diamantschleifern aufgeraut wurden [47]. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch Yesilyurt et al.: Die Oberflächenvorbehandlung mit Diamantschleifkörpern und die Anwendung eines geeigneten Adhäsivsystems werden als effektives Reparaturprocedere empfohlen [50].

Neben den aufgeführten Instrumenten zur makromechanischen Oberflächenvorbehandlung, wurden Apparaturen zur mikromechanischen Oberflächenvorbehandlung in die Zahnheilkunde eingeführt. Diese Art der kinetischen Präparation führt zu einer Reduktion der Substratoberfläche, sowie zur Schaffung mikromechanischer Retentionen [41]. Es handelt sich verallgemeinernd um Korundstrahlgeräte die mit unterschiedlichen Abrasivstoffen beladen werden. Dabei kann es sich beispielsweise um Aluminiumoxid-Partikel diverser Korngrößen als auch wie im Fall des Cojet-Systems (3M ESPE, Seefeld, Deutschland) um mit Kieselsäure modifiziertem Aluminiumoxid handeln. Das Cojet-System wurde zur intraoralen Reparatur von Verblendungen entwickelt. Diesem System zugrunde liegt das Prinzip der tribochemischen Beschichtung der zu reparierenden Oberfläche [51]. Die zu reparierende Oberfläche wird mit dem mit Kieselsäure modifizierten Aluminiumoxid bestrahlt, wobei die Aufprallenergie der Partikel auf der Oberfläche und die dadurch entstehende hohe Temperatur, die Komponenten in die zu reparierende Oberfläche eindringen und diese mit einer Silikatschicht überziehen, welche dann sowohl mikromechanische Retentionen als auch chemische Adhäsionsmöglichkeiten in Form einer Silanbindung bietet, vergleichbar mit der chemischen Bindung von silanisierten Füllern in kunststoffbasierten Kompositen, an das Reparaturkomposit [51]. Bouschlicher et al. verzeichneten bei der Verwendung des Cojet-Systems die höchsten Verbundwerte unabhängig davon ob die Applikation eines Silans erfolgte oder nicht [52]. Gemäß der Studie von Brosh et al. kann die Reparaturstärke durch die Anwendung von Korundstrahlgeräten in Verbindung mit der Applikation eines Adhäsivsystems verbessert werden. Dies wird auf die bessere Oberflächenbenetzbarkeit bei der Verwendung von Haftvermittlern zurückgeführt, da es dem Kunststoff hierdurch besser ermöglicht wird in mikroskopische Retentionen zu penetrieren. Die Scherhaftfestigkeiten von Reparaturen deren Substratoberfläche mit Kroundstrahlgeräten vorbehandelt wurde, konnte um durchschnittlich 4,19 MPa gesteigert werden, verglichen mit der Vorbehandlung durch Korundsteine oder Diamantschleifkörper (2,4 und

0.64 MPa) [48]. Yesilyurt et al. erreichten durch das Strahlen mit Aluminiumoxid klinisch akzeptable Reparaturergebnisse [50]. Unter den getesteten Oberflächenvorbehandlungen in der Studie von Lucena-Martín et al. wurden durch Korundstrahlen die besten Resultate erreicht [53]. Die Zusammensetzung der verwendeten Komposite hatte keinen Einfluß auf den Effekt der Oberflächenvorbehandlung. Darüber hinaus konnte ein synergistischer Effekt zwischen der mechanischen Oberflächenvorbehandlung und den Dentinadhäsiven beobachtet werden. Die Reparaturfestigkeit erreichte bei der Kombination von Korundstrahlen und Verwendung eines Ein-Komponenten-Adhäsivs nahezu die kohäsive Stärke eines nicht reparierten Kompositsubstrates [53].

Das Bestrahlen mit Aluminiumoxid oder modifiziertem Aluminiumoxid liefert eine gleichmäßigere Oberflächentopografie als die Verwendung von Diamantschleifkörpern [54]. Dies bedingt die Schaffung einer besseren Grundlage der mikromechanischen Retention und folglich höhere Verbundstärken [54]. Verglichen mit dem Cojet-System ergaben sich bei der Bestrahlung der Oberfläche mit Aluminiumoxid keine nennenswerten Unterschiede hinsichtlich der Reparaturfestigkeit [54]. Ähnliche Ergebnisse zeigte die Studie von Renastiti et al., und Brendeke et al., welche verschiedene Oberflächenvorbehandlungen und -konditionierungen hinsichtlich ihres Verhaltens auf die Reparaturfestigkeit von mikrohybrid, nanohybrid und nanogefüllten Kompositen untersuchten, wobei die Art des Komposites einen signifikanten Einfluß auf diese hatte [55]. Die mit Cojet behandelten Gruppen zeigten bei Brendeke et al., eine Reparaturfestigkeit von $7,8 \pm 1,2$ MPa bis $11,6 \pm 5,0$ MPa im Gegensatz zu den nicht mit Cojet behandelten Gruppen ($4,6 \pm 2,3$ bis $7,6 \pm 3,9$ MPa) [42]. Papacchini et al. [45] konnten bei der Bestrahlung der Kompositoberflächen mit Aluminiumoxidpartikeln mit einer Größe von 50 µm signifikante Verbesserungen der Reparaturfestigkeit aufweisen [45]. Bei der zusätzlichen Verwendung eines Haftvermittlers entsprachen die gemessenen Werte nahezu der kohäsiven Stärke des nicht reparierten Substrates [45].

Der Wert der mechanischen Oberflächenvorbehandlung wird von einigen Autoren nicht als essentiell bewertet [42] [56-58]. Dies wird einerseits auf die Exposition der Füllkörper mit reduzierter Verbundfläche des Haftvermittlers mit der Kunststoffmatrix zurückgeführt. Andererseits führt der verbleibende Oberflächendebris und Lufteinschlüsse durch eine ungleichmäßige Oberflächentopografie zu einer reduzierten Oberfläche und verminderter Benetzbarkeit durch den Haftvermittler [44]. Durch die Temperaturerhöhung, sei sie durch rotierende Instrumente oder eine kinetische Präparation wie beispielsweise beim Korundstrahlen bedingt, kommt es nach Vankerckhoven et al., durch die thermische Aktivierung der C-C-Doppelbindungen, zu einer reduzierten Verfügbarkeit von kovalenten Bindungen mit der Polymermatrix [56]. Eine neuere

Studie zeigte, dass das Korundstrahlen der Substratoberfläche mit siliziummodifiziertem Aluminiumoxid-Partikeln und anschließender Applikation eines Silans keinen Vorteil gegenüber anderen Adhäsivsystemen mit sich bringe [57]. Die Kombination eines Diamantschleifkörpers und der Verwendung eines Dentin-Adhäsivsystems führte bei Frankenberger et al. zu einer reduzierten Reparaturfestigkeit sowohl bei neuen als auch bei gealterten Substraten [58].

Loomans et al. können keines der genannten Reparaturprozedere als universell anwendbar empfehlen. Um eine optimale Reparaturfestigkeit zu erreichen ist die Kenntnis der Zusammensetzung des zu reparierenden Komposites von Vorteil [41].

Chemische Oberflächenvorbehandlung

Unter chemische Oberflächenvorbehandlung fallen die Anwendung von Flusssäure, Phosphorsäure, Hexafluoridokieselsäure sowie das Reinigen der Oberfläche mit Aceton, Ethanol, Chloroform und Ethylacetat [41].

Beim Gebrauch von Phosphorsäure zur chemischen Oberflächenvorbehandlung wird wenig zusätzliche Ausrüstung benötigt, was somit eine kostengünstige Option darstellt, wobei jedoch ihr Einfluß auf die Reparaturfestigkeit unterschiedlich bewertet wird [41]. Loomans et al., wandten verschiedene Ätzprotokolle mit Phosphorsäure und Flusssäure bei Kompositen mit unterschiedlicher Füllkörperzusammensetzung an und untersuchten deren Auswirkung auf die Oberflächenrauigkeit, wobei neben einem Reinigungseffekt keine Veränderungen an der Oberfläche der Komposite beobachtet werden konnten [59]. Auch Cesar et al. konnten mikroskopisch keine Veränderung der Oberfläche nach Phosphorsäureanwendung beobachten [60]. Bei Meeker et al. führte die Kombination von Phosphorsäure und der Applikation eines Haftvermittlers zu einer deutlichen Steigerung der Reparaturfestigkeit [61]. Dies sei auf den Reinigungseffekt, von gelösten Schleifpartikeln auf der Substratoberfläche, durch die Phosphorsäure zurückzuführen. Hiermit wird eine für den Haftvermittler besser benetzbare Oberfläche geschaffen. Jedoch konnten Bonstein et al. keinen Anstieg der Reparaturfestigkeit bei alleiniger Verwendung von Phosphorsäure verzeichnen [49]. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit Crumpler et al., [60] Lucena-Martín et al., [51] Swift et al., [61] und Dall'oca et al., [64]. Auch Calvacanti et al. konnten keine Verbesserung des Verbundes im Vergleich zu anderen Oberflächenvorbehandlungen feststellen [65]. Es kann angenommen werden, dass eine adäquate Oberflächenreinigung durch ein selbstätzendes Adhäsivsystem erreicht wird und damit bei Verwendung eines solchen auf die zusätzliche Säurekonditionierung mit Phosphorsäure verzichtet werden kann [65].

Der Vergleich der aufgeführten Studien zeigt die teils kontroversen Forschungsergebnisse. Die Mehrzahl der Autoren bewertet den Wert der Oberflächenvorbehandlung für die Reparatur von Kompositrestaurationen jedoch positiv. Die einzelnen Komponenten der Oberflächenvorbehandlung und -konditionierung sollten jedoch nicht gesondert betrachtet werden. Deshalb wird im Folgenden das Augenmerk auf die Verwendung von Haftvermittlern gerichtet.

2.5 Verbundsysteme

Die unreaktierten freien C-C-Doppelbindungen auf der Oberfläche polymerisierten Komposites, erlauben dem Monomer eines frischen Komposites einen Verbund zu diesem herzustellen [56].

Während des Alterungsprozesses innerhalb der Mundhöhle manifestieren sich jedoch zahlreiche Änderungen des Komposites, beispielsweise Wasseraufnahme, chemischer Zerfall und Verlust einiger Komponenten [66]. Diese Veränderungen der Oberfläche eines gealterten Komposites beeinflussen seinen Verbund zu einem Reparaturmaterial, durch die verminderte Anzahl nicht umgesetzter Methacrylatgruppen [56].

Um den Verbund zwischen der zu reparierenden Kompositrestauration und dem Reparaturkomposit zu optimieren, bedarf es einerseits der schon beschriebenen Oberflächenvorbehandlung und andererseits der Applikation eines Verbundsystems [14].

Als Verbundsystem kann der Einsatz von Silanen, Adhäsiven, der Kombination eines Silans und eines Adhäsivs, und kunststoffbasierten Kompositen, „flowables“ niedriger Viskosität, dienen [14].

Organofunktionelle Trialkoxysilane, im Weiteren kurz als „Silane“ bezeichnet, besitzen zwei funktionelle Gruppen. Zum einen Silanol, welches für die Bindung zu den Siliziumfüllern im Komposit verantwortlich ist und die organische Gruppe, welche die Bindung zu den, im Adhäsiv vorhandenen Methacrylatgruppen herstellt [67]. Silane erhöhen die Oberflächenbenetzbarkeit und werden mit einer besseren Infiltration der Adhäsivsysteme in die Topografie der vorbehandelten Oberfläche in Verbindung gebracht. Die alleinige Verwendung eines Silans in der Kompositreparatur wird jedoch kontrovers diskutiert [66] [42]. Hisamatsu et al. untersuchten den Einfluß von zwei verschiedenen Silanen und zwei unterschiedlichen Adhäsiven auf die Reparaturfestigkeit eines kunststoffbasierten Komposites. Die Prüfkörper wurden mit einem Siliziumkarbidschleifkörper aufgeraut und mit einem der beiden Silane oder Adhäsive oder mit einem von vier möglichen Kombinationen, aus Silan und Adhäsiv, konditioniert. Abschließend zeigten die Gruppen, welche sowohl mit einem Silan als auch einem Adhäsiv konditioniert wurden die höchsten Scherhaftfestigkeiten [69]. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen Bredecke et al. Bei

Verwendung des Cojet-Systems mit anschließender Silanisierung kamen fast ausschließlich kohäsive Frakturen im Substrat, im Gegensatz zur alleinigen Verwendung eines Silans oder Adhäsives, vor [42].

Um die Reparaturfestigkeit zu erhöhen wird die Applikation eines Adhäsivs empfohlen. Dies liegt in der Annahme begründet, dass Monomere in die vorbehandelte Oberfläche penetrieren und eine unpolymersierte Schicht nach der Lichtexposition hinterlassen, die eine Bindung zum aufgetragenen Reparaturkomposit ermöglicht [69]. Dabei existieren drei Mechanismen, die für den Verbund von Substrat und Reparaturkomposit ausschlaggebend sind [70]. Einerseits der chemische Verbund zur Kunststoffmatrix, der chemische Verbund zu den exponierten anorganischen Füllern und eine mikromechanische Retention die durch die Penetration der Monomere in Mikrorisse bzw. Mikroporositäten auf der Oberfläche der Kunststoffmatrix zustande kommen [48].

Brosh et al. untersuchten 1997 den Effekt der Verwendung unterschiedlicher Oberflächenbearbeitungen und die Verwendung unterschiedlicher Haftvermittler auf die Verbundfestigkeit von reparierten Kompositen [70]. Hierbei kam man zu dem Ergebnis, dass die Verwendung von Adhäsiven, ob alleine angewandt oder in Kombination mit Silanen, das effektivste Reparaturprozedere darstellt, wobei dies unabhängig war von der angewandten Oberflächenvorbehandlung. In den Gruppen in denen keine Adhäsive oder Silane zur Reparatur verwendet wurden, wurden signifikant niedrigere Reparaturfestigkeiten erreicht [48].

Den Einfluß von Adhäsiven auf den Verbund verschiedener Befestigungskomposite zu CAD/CAM-Kompositen untersuchten Bähr et. al, wobei die Resultate der Studie zeigten, dass zur Oberfläche korundgestrahlter CAD/CAM-Komposite ohne weitere Konditionierung kein suffizienter Verbund zu den Befestigungskompositen hergestellt werden konnte [11]. Dies legt nahe, dass eine mikromechanische Retention alleine nicht ausreicht um einen zufriedenstellenden Verbund zwischen dem CAD/CAM-Komposite und dem Befestigungskomposit zu erlangen [11].

Mit dem Einfluß der Zusammensetzung der Haftvermittler auf die Reparaturfestigkeit von Kompositen beschäftigten sich Tezvergil et al. [70]. In dieser Studie über die Reparatur von Kompositen, kamen Haftvermittler mit unterschiedlichen Zusammensetzungen und Anwendungsprotokollen zum Einsatz. Untersucht wurden die Reparaturfestigkeiten von einem Ein-Schritt-Adhäsivsystem, welches aus einer Kombination von Dimethacrylaten mit funktionellen Phosphat-Gruppen und Silan bestand, einem Mehr-Schritt-Adhäsivsystem, welches aus der Applikation eines Silan-Monomer-Gemisches und der anschließenden Behandlung mit einem ungefüllten Kunststoff bestand, sowie einem Adhäsivsystem, welches nur aus einem ungefüllten Kunststoff bestand. Das Mehr-Schritt-Adhäsivsystem erreichte höhere Reparaturfestigkeiten als die anderen Konditionierungsmethoden. Die höheren Verbundfestigkeiten, die mit dem Mehr-Schritt-

Adhäsivsystem beobachtet wurden, könnten durch die Ausbildung von Siloxan Bindungen herrühren, welche durch die Silanvorbehandlung zwischen den, durch die vorangegangene mikromechanische Oberflächenvorbehandlung, exponierten Füllkörpern und der Polymermatrix des Kunststoffes gebildet werden. Trotz der besseren Reparaturfestigkeiten mit dem angewandten Mehr-Schritt-Adhäsivsystem bieten die Ein-Schritt-Adhäsivsysteme den Vorteil der geringeren Fehleranfälligkeit bei der intraoralen Reparatur von Kompositen bei vergleichbaren Reparaturfestigkeiten [71]. Während Bouschlicher et al. [50] und Matinlinna et al. [65] keine signifikante Steigerung des Verbundes bei der Verwendung von Silanen als Haftvermittler feststellen konnten, gehen andere Autoren von einer Verbesserung der Reparaturfestigkeit durch den Einsatz von Silanen aus [68-69].

Um den Effekt verschiedener Haftvermittler auf die Mikrozugfestigkeit von Kompositreparaturen zu evaluieren, wählten Papacchini et al. [43] zwei Komposite niedriger Viskosität und zwei Adhäsive als Haftvermittler und verglichen diese hinsichtlich ihres Einflusses auf die Reparaturfestigkeit. Das Kompositsubstrat und die Wahl des Verbundsystemes präsentierten sich als signifikante Faktoren. Die Applikation eines „flowable“-Komposites resultierte zwar in einer statistisch höheren Reparaturfestigkeit als die Adhäsive, beide sorgten aber für einen guten Verbund [45]. Durch die Verwendung von ungefüllten Kunststoffen als Haftvermittler bei Kompositreparaturen, soll eine höhere Oberflächenenergie, eine bessere Benetzbarkeit sowie eine gewisse Auflösung und Quellung der zu reparierenden Kompositoberfläche erreicht werden [72]. Lloyd et al. erreichten bei der Reparatur mit einem ungefüllten Kunststoff als Haftvermittler Ergebnisse die mit der kohäsiven Stärke unreparierter Kompositrestaurationen vergleichbar sind. In ihrer Studie wurden die Prüfkörper jedoch keiner thermischen Alterung unterzogen [73].

3. Fragestellung, Ziele und Hypothesen

Das Ziel dieser Studie war es die Effizienz der Reparatur eines künstlich gealterten CAD/CAM-Komposites mithilfe verschiedener Konditionierungsmethoden sowie unterschiedlichen Kompositen als Reparaturmaterial nach unterschiedlichen Vorbehandlungen der Oberfläche zu untersuchen.

Neben dem eben genannten Hauptziel wurde der Fokus auf die Fragen, welcher Haftvermittler die höchste Verbundfestigkeit ermöglicht, welche Oberflächenvorbehandlung die höchsten Zugfestigkeiten generiert, und inwiefern die Wahl des Reparaturkomposites die Reparatureffizienz beeinflusst, gerichtet.

Da es zu einer Kontamination der Oberfläche mit Wasser oder Phosphorsäure während der intraoralen Reparatur kommen kann, sollten auch diese Situationen in der Studie simuliert werden und ihr Einfluß auf die Reparatur bestimmt werden.

Die getesteten Parameter waren:

1. die Oberflächenvorbehandlung (korundstrahlen, naß und trocken, sowie die Verwendung eines Siliziumkarbid-Schleifers)
2. die Oberflächenkonditionierung (bestehend aus fünf verschiedenen Reparaturkits)
3. die Wahl des Reparaturkomposites (hohes und niedriges E-Modul)
4. die Kontamination der mit Cojet vorbehandelten Oberfläche
5. die Reinigung der vorbehandelten Oberfläche mit Phosphorsäure haben keinen Einfluß auf die Reparaturfestigkeit.

4. Material und Methode

In dieser Studie wurde in einem Zugversuch die Verbundfestigkeit der Reparatur des CAD/CAM-Komposites LAVA Ultimate (3M ESPE, Seefeld, Deutschland) mit zwei verschiedenen kunststoffbasierten Kompositen, in Verbindung mit verschiedenen Methoden zur Oberflächenvorbehandlung und Anwendung vier unterschiedlicher Adhäsive untersucht.

Nach der später beschriebenen Alterung des CAD/CAM-Komposites wurde eine Reparatur mit den beiden Reparaturkompositen simuliert, wobei zuvor eine Oberflächenvorbehandlung des CAD/CAM-Komposites mit den eben aufgeführten Materialien zur Oberflächenvorbehandlung stattfand. Die Hälfte der Substratoberflächen wurde nach der Oberflächenvorbehandlung mit Phosphorsäure gereinigt. Anschließend erfolgte eine Konditionierung mit jeweils einem der genannten Adhäsive sowie die Anfertigung einer Kontrollgruppe in der kein Adhäsiv verwendet wurde. Daraus ergeben sich 900 Prüfkörper eingeteilt in 60 Gruppen à 15 Prüfkörper ($n=15$).

Nach der Herstellung der Prüfkörper wurden diese in destilliertem Wasser für 24 Stunden gelagert und danach einer weiteren Alterung im Thermowechselbad unterzogen und abschließend auf ihre Zughaftfestigkeit und ihren Bruchmodus untersucht.

4.1 Materialien

Die verwendeten Komposite sind in Tabelle 1, die verwendeten Materialien zur Oberflächenvorbehandlung in Tabelle 2, und die Adhäsive in Tabelle 3 aufgeführt.

Komposite

Als Substrat diente in dieser Studie das CAD/CAM-Komposit LAVA Ultimate (3M ESPE, Seefeld, Deutschland). Als Reparaturkomposite kamen GrandioSO (Voco, Cuxhaven, Deutschland) und Arabesk Top (Voco, Cuxhaven, Deutschland) zur Anwendung.

Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten Komposite, deren Verarbeitung und Zusammensetzungen

Material	Lava Ultimate (3M ESPE, Seefeld, Deutschland)	GrandioSO (Voco, Cuxhaven, Deutschland)	Arabesk Top (Voco, Cuxhaven, Deutschland)
Typ	CAD/CAM-Komposit	Nano-Hybridkomposit	Mikro-Hybridkomposit
LOT-Nummer	N392136	1327362,1334312	1246419
Farbe	A2	A2	A2
Verarbeitung	CAD/CAM-Herstellung	Polymerisation der 2mm Inkremente für jeweils 20 s, abschließend Polymerisation von 3 verschiedenen Seiten für jeweils 20 s	Polymerisation der 2mm Inkremente für jeweils 20 s, abschließend Polymerisation von 3 verschiedenen Seiten für jeweils 20 s
Matrix	hochvernetztes Polymer	BisGMA, BisEMA, TEGDMA	BisGMA, UDMA, TEGDMA
Füllkörper	Siliziumoxidnanomere, Zirkoniumdioxidnanomere, Siliziumoxidnanocluster, Zirkoniumdioxidnanocluster	Glaskeramikfüller, Funktionalisierte Siliziumdioxid Nanopartikel	Glaskeramik-Mikrofüller Glaskeramik-Kleinstpartikelfüller
Füllstoffgehalt	80 Gew%	89 Gew%	77 Gew%

Legende der verwendeten Abkürzungen: BisGMA = Bisphenol- A-diglycidylmethacrylat, Bis-EMA = Bisphenol-A-polyethylene-glycol-diether-dimethacrylat, UDMA = Urethane-dimethacrylat, TEGDMA = Triethyleneglycol-dimethacrylat

Oberflächenvorbehandlungen

Zur Simulation der Reparatur des CAD/CAM-Komposites wurden die Substratoberflächen verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen unterzogen. Diese beinhalteten das Korundstrahlen mit dem Cojet System (3M ESPE, Seefeld, Deutschland), einmal naß, zum anderen trocken sowie das Anrauen der Substratoberfläche mit Siliziumcarbid-Schleifern aus dem Cimara-Set (Voco, Cuxhaven, Deutschland). Die Hälfte der Substratoberflächen wurde unmittelbar nach der Oberflächenvorbehandlung mit Phosphorsäure gereinigt.

Tabelle 2: Übersicht über die verwendeten Oberflächenvorbehandlungen, deren Verarbeitung und Zusammensetzungen

Material	Zusammensetzung	Hersteller	Lot-Nummer	Anwendungsprotokoll
Cojet trocken	Silikatisiertes Al_2O_3 (30 μm)	3M ESPE, Seefeld, Deutschland	516365	Bestrahlung mit 3 bar Druck, senkrecht zur Substratoberfläche für 10 s, bei einem Abstand von 10 mm
Cojet naß	Silikatisiertes Al_2O_3 (30 μm) und destilliertes Wasser	3M ESPE, Seefeld, Deutschland	516365	Bestrahlung mit 3 bar Druck, senkrecht zur Substratoberfläche für 10 s, bei einem Abstand von 10 mm und anschließende Reinigung mit destilliertem Wasser für 30 s
Cimara Schleifer	Siliziumcarbid	Voco, Cuxhaven, Deutschland	PP-2012-890, 027258	Anrauen der Oberfläche bei 6000-10000 Umdrehungen pro Minute
Phosphorsäure	Wasser, Phosphorsäure SiO_2 , Al_2O_3 , Polyethylenglykol	3M ESPE, Seefeld, Deutschland	520594, R22282	Applikation für 30 s und anschließende Reinigung für 30 s mit destilliertem Wasser

Legende der verwendeten Abkürzungen: Al_2O_3 = Aluminiumoxid, SiO_2 = Siliziumoxid

Haftvermittler

Nach der Oberflächenvorbehandlung kamen zur Konditionierung der Substratoberflächen vier verschiedene Haftvermittler zum Einsatz. Die Applikation war bei allen Haftvermittlern gleich: Die Haftvermittler wurden für 20 s auf die Substratoberflächen einmassiert, danach mit einem ölfreien Luftstrom verblasen und schließlich für 10 s lichtgehärtet. Ein Teil der Prüfkörper fungierte als Kontrollgruppe und erfuhr keine Konditionierung mit einem Haftvermittler.

Tabelle 3: Übersicht über die verwendeten Haftvermittler und deren Zusammensetzungen

Adhäsiv	Zusammensetzung	Hersteller	Lot-Nummer
Futurabond U	HEMA, BIS-GMA, HDDMA, UDMA, Säuremonomer	Voco, Cuxhaven, Deutschland	1327615
One Coat Bond	HEMA, HPMA, methacrylat modifizierte Polyacrylsäure, UDMA, Glycerol, Dimethacrylate, amorphe Kieselsäure, Wasser	Coltene, Altstätten, Schweiz	F24467
Scotchbond Universal	MDP, Dimethacrylate, HEMA, Vitrebond Copolymer, Füller, Ethanol, Wasser, Silan	3M ESPE, Seefeld, Deutschland	521215
visio.link	MMA, PETA, DPPO	Bredent, Senden, Deutschland	114784

Legende der verwendeten Abkürzungen: HEMA = Hydroxyethylmethacrylat, BIS-GMA = Bisphenol-A-diglycidylmethacrylat, HDDMA = Hexadioldimethacrylat, UDMA = Urethane-dimethacrylat, HPMA = Hydroxypropylmethacrylat, MDP = 10-methacryloyloxydecyl-dihydrogenphosphat, PETA = Pentaerythrioltriacyrlat

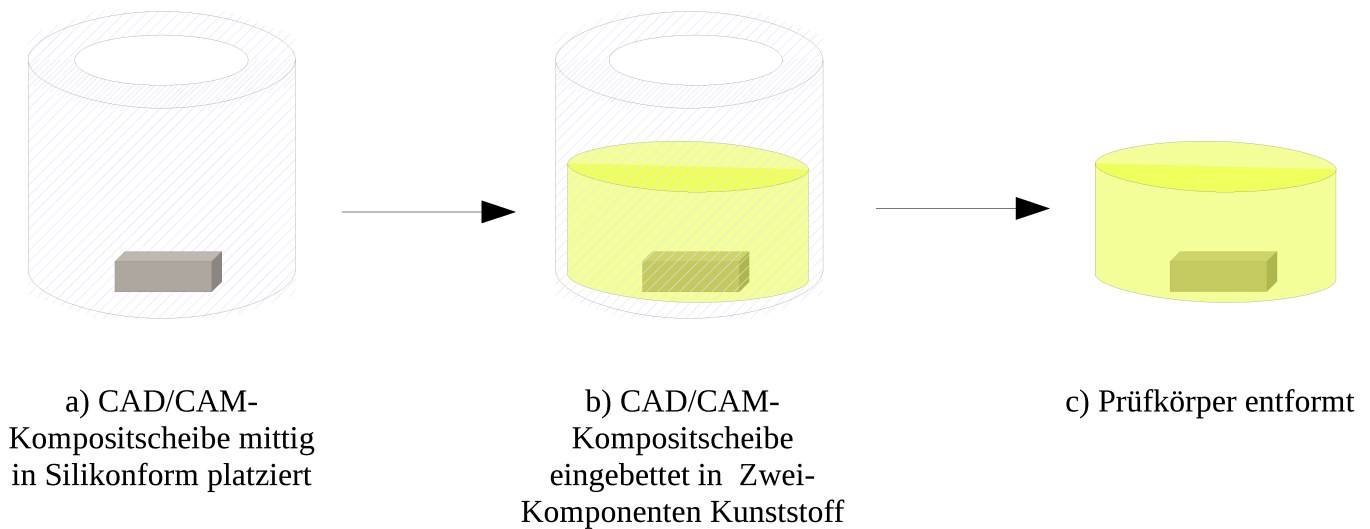
4.2 Methode

Prüfkörperherstellung

Mithilfe einer vollautomatischen Schneidemaschine (Secotom-50, Struers, Ballerup, Dänemark), die mit einer Rotationsgeschwindigkeit von 2200 Umdrehungen pro Minute und einem Vorschub von 0,1 mm/s arbeitete, wurden unter Wasserkühlung neunhundert Scheiben mit den Maßen 3 mm Dicke, 5 mm Breite und 5 mm Länge aus CAD/CAM-Kompositblöcken geschnitten. Diese wurden anschließend mittig in einer Silikonform platziert und in einem selbsthärtenden zwei-Komponenten Kunststoff (ScandiQuick, ScanDia, Hagen, Deutschland; Lot-Nummer 542125/142125) eingebettet. Der zwei-Komponenten Kunststoff wurde entsprechend den Herstellerangaben in einem Silikonapf, mit einem Holzspatel angemischt und in die Silikonformen eingebracht. Nach der

Aushärtung des zwei-Komponenten Kunststoffes wurde der Prüfkörper aus der Silikonform entformt.

Abbildung 1: Herstellung der Prüfkörper

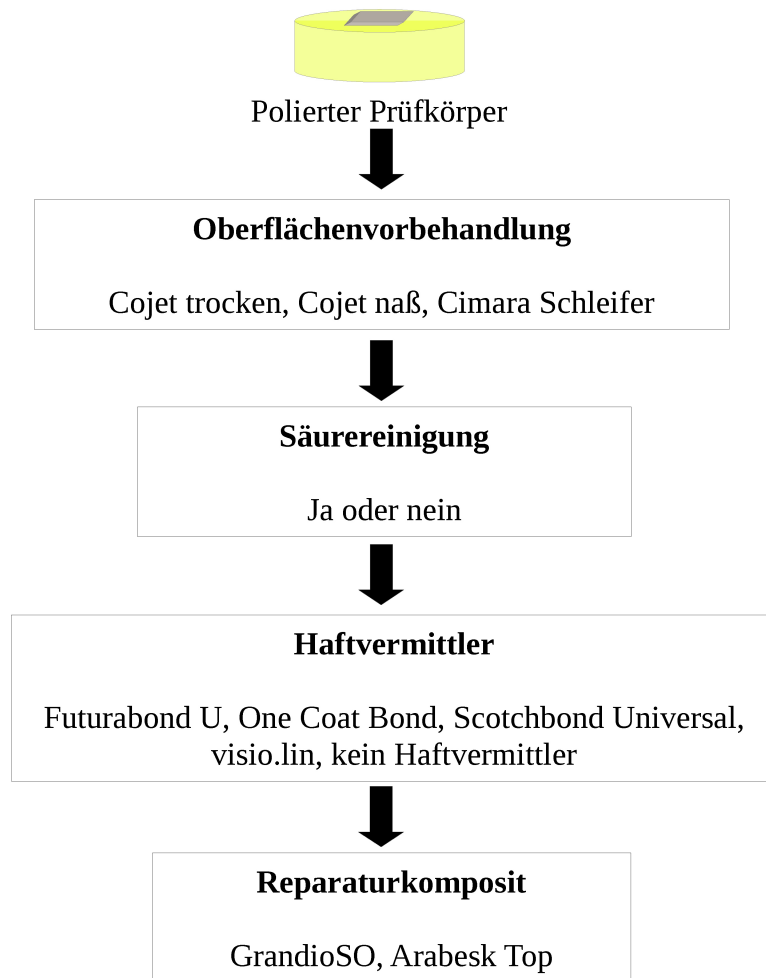


Die Oberflächen der Prüfkörper wurden unter Wasserkühlung in einer Poliermaschine (Tegamin-20, Stuers) mit einer Reihe Siliziumcarbide-Papiere nach dem folgenden Protokoll bis zu einer Körnung von SiC P2400 poliert.

Reparaturfläche:	SiC 500 für 10 s bei einem Anpressdruck von 40 N
	SiC 1200 für 20 s bei einem Anpressdruck von 40 N
	SiC 2400 für 30 s bei einem Anpressdruck von 40 N
Unterseite:	SiC 500 für 20 s bei einem Anpressdruck von 40 N

Alle polierten Oberflächen wurden danach für 10000 Zyklen in einem Thermowechselbad (Thermocycler THE-1100, SD Mechatronik, Feldkirchen-Westerham, Deutschland) mit den Temperaturen 5 °C und 55 °C künstlich gealtert, wobei die Aufenthaltsdauer in den beiden Bädern jeweils 20 Sekunden betrug.

Abbildung 2: Übersicht über die Herstellung der Reparatur



Herstellung der Reparatur

Die polierten Prüfkörper wurden in drei Gruppen zur Oberflächenvorbehandlung eingeteilt.

Cojet trocken

Das Korundstrahlgerät des Cojet-Systems (3M ESPE, Seefeld, Deutschland) wurde an den dafür vorgesehenen Anschluß an der zahnärztlichen Behandlungseinheit angeschlossen und der Druck auf 3 bar eingestellt. Die auf der polierten Prüfkörperoberfläche eingebetteten CAD/CAM-Kompositscheiben wurden für 10 s in einem Abstand von 10 mm in einem Winkel von 90° mit dem Cojet-Sand bestrahlt. Abschließend wurden Verunreinigungen durch das Strahlmittel oder Rückstände, durch 10 s Druckluftreinigung mit dem Luftbläser der zahnärztlichen Behandlungseinheit entfernt.

Cojet naß

Um die Kontamination mit Flüssigkeiten während der Reparatur des CAD/CAM-Komposites zu simulieren, erfolgte bei einem Drittel der Prüfkörperoberflächen die Oberflächenvorbehandlung mit Cojet naß. Die Oberflächenvorbehandlung mit Cojet naß erfolgte simultan zur Oberflächenvorbehandlung mit Cojet trocken. Nach dem Bestrahlen der Substratoberfläche erfolgte statt der Druckluftreinigung jedoch ein Absprühen mit Wasser für 10 s mit anschließender Trocknung mit Druckluft für 10 s.

Siliziumkarbidschleifer

Die Siliziumkarbidschleifkörper aus dem Cimara Reparaturset (Voco, Cuxhaven, Deutschland) wurden in ein zahntechnisches Handstück eingespannt und die Substratoberfläche bei einer Umdrehungszahl von 10000 Umdrehungen pro Minute drucklos und trocken bearbeitet, bis die gesamte Oberfläche des eingebetteten CAD/CAM-Komposites aufgeraut war. Das genaue Vorgehen der einzelnen Oberflächenvorbehandlungen in dieser Studie ist in Tabelle 2 beschrieben.

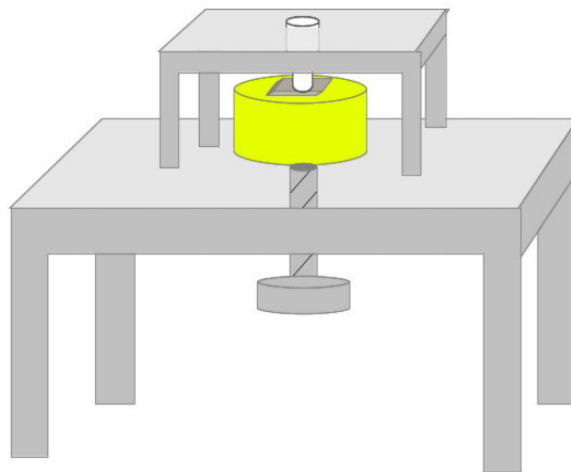
Nach den verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen wurde jeweils die Hälfte der Substratoberflächen mit Phosphorsäure gereinigt. Die Substratoberfläche wurde vollständig mit Phosphorsäure bedeckt, diese für 30 s belassen, für weitere 30 s mit einem Druckluft-Wasser-Spray gereinigt und abschließend für 10 s mit Druckluft getrocknet. Schließlich erfolgte die Applikation der Haftvermittler. Jeder der vier Haftvermittler wurde mit einem Pinsel auf die Substratoberfläche aufgebracht und für 20 s einmassiert, für 5 s mit einem trockenen, ölfreien Luftstrom verblasen und für 10 s lichtpolymerisiert. Die Lichtpolymerisation erfolgte mit einer LED-Polymerisationslampe (VALO, Ultradent Products Inc., South Jordan, UT, Vereinigte Staaten von Amerika, standard power mode, 1176 mW/cm²) ohne Abstand zur Substratoberfläche für 10 s. Innerhalb der Kontrollgruppen erfolgte keine Applikation eines Haftvermittlers.

Der Applikation der Haftvermittler folgte die Reparatur der konditionierten Substratoberfläche. Die Prüfkörper wurden mit zwei verschiedenen kunststoffbasierten Kompositen (Arabesk Top and GrandioSo, n = 15 pro Komposit) nach dem folgenden Protokoll repariert:

Die Prüfkörper wurden in eine Haltevorrichtung positioniert und ein Acrylzylinder (SD Mechatronik) mit einem Innendurchmesser von 2,9 mm und einer Höhe von 4,5 mm wurde auf der

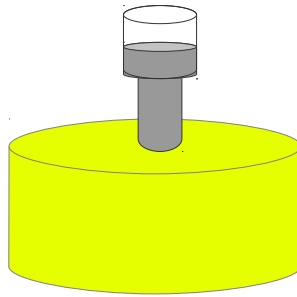
konditionierten Oberfläche des CAD/CAM-Komposites fixiert. (Abbildung 3) Danach wurde der Zylinder mit dem jeweiligen Reparaturkomposit, mithilfe von zahnärztlichen Füllinstrumenten in zwei Schichten, gefüllt und polymerisiert.

Abbildung 3: Haltevorrichtung mit fixiertem Prüfkörper, bereit zum Einbringen des Reparaturkomposites



Die Polymerisation erfolgte mit einer LED-Polymerisationslampe (VALO, Ultradent Products Inc., South Jordan, UT, Vereinigte Staaten von Amerika, standard power mode, 1176 mW/cm²). Nach der Lichtpolymerisation des zweiten Inkrements folgten drei weitere Polymerisationen aus drei unterschiedlichen Richtungen. Die Lichtquelle wurde ohne Abstand direkt auf den Acrylzylinder ausgerichtet und nach jedem Polymerisationsvorgang erfolgte eine optische Kontrolle der Lampe auf eventuelle Verunreinigungen. Die Prüfkörper wurden aus der Haltevorrichtung entnommen und anschließend für 24 Stunden in destillierten Wasser bei 37 °C aufbewahrt, um ihnen Zeit für die endgültige Polymerisation zu geben.

Abbildung 4: Fertige Reparatur



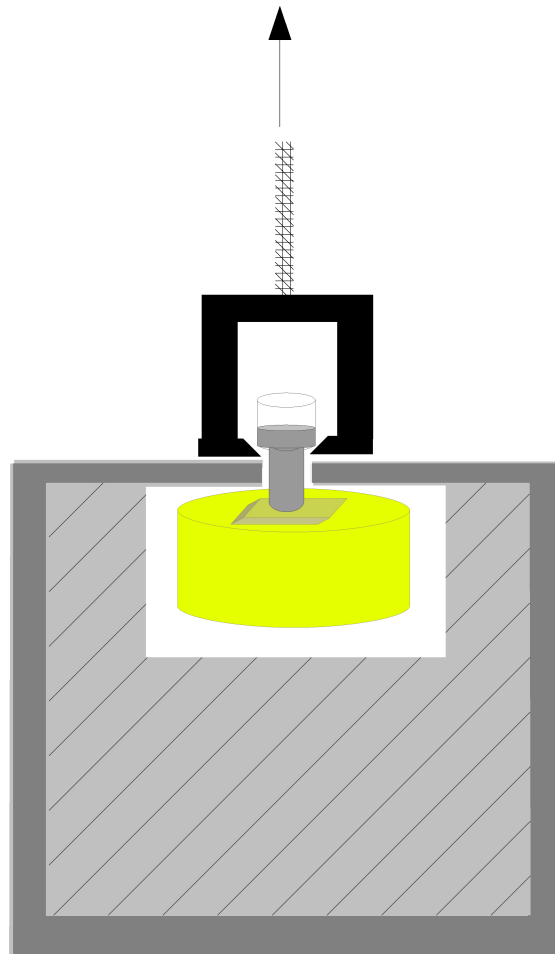
Die fertigen Prüfkörper (Abbildung 4) wurden einer zusätzlichen Alterung durch weitere 10000 Zyklen im Thermowechselbad bei Temperaturen zwischen 5 °C und 55 °C mit einer jeweiligen Verweildauer von 20 Sekunden in den beiden temperierten Becken unterzogen.

Zugversuch

Die Zugfestigkeit wurde mit einer Universalprüfmaschine (MCE 2000 ST, Quicktest, Langenfeld, Deutschland) gemessen. Dazu wurden die Prüfkörper in eine spezielle Halterung positioniert die eine momentfreie axiale Krafteinwirkung gewährleistet. Eine Spannzange hielt den Zylinder, während eine Justiervorrichtung die Selbstzentrierung der Prüfkörper erlaubte. Diese Vorrichtung war mit einer Wägezelle verbunden und wurde von einer oberen und unteren Kette auseinandergezogen, wobei es dem gesamten System möglich war sich selbst zu zentrieren. Die Prüfkörper wurden mit einer Zuggeschwindigkeit von 5 mm/min bis zum Bruch belastet. Zum Zeitpunkt des Bruches wurden die Werte in der Einheit Newton aufgezeichnet.

Die Verbundfestigkeit wurde durch die Formel $\sigma = F / A$ (σ = Zughaftfestigkeit, F = Kraft in N, A = Verbundfläche in mm²) berechnet.

Abbildung 5: Schema zum Aufbau des Zugversuchs



Frakturbilder

Die Frakturbilder wurden durch Analyse der Prüfkörper unter einem Stereomikroskop (Axioskop 2Mat, Carl Zeiss Microscopy, LLC, Thornwood, NY, US) bestimmt.

Sie wurden in drei Haupttypen unterteilt:

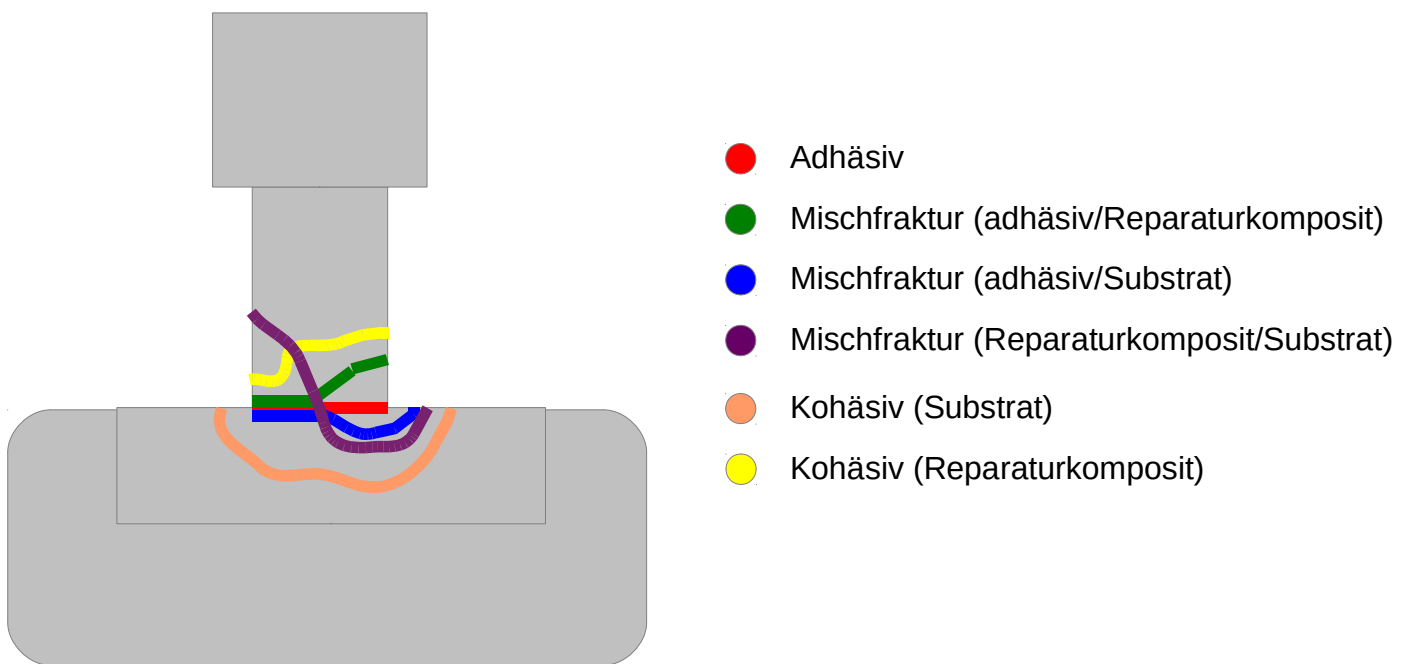
- 1) adhäsiv, wenn der Bruch in der Verbundfläche zwischen CAD/CAM-Komposit und dem Reparaturkomposit
- 2) kohäsiv, wenn der Bruch im CAD/CAM-Komposit oder im Reparaturkomposit und
- 3) Mischfrakturen.

Innerhalb der Gruppen erfolgte eine weitere Unterteilung. So wurde in der Gruppe der kohäsiven Frakturen zwischen einer kohäsiven Fraktur im Substrat und im Reparaturkomposit unterschieden. In der Gruppe der Mischfrakturen wurde erstens zwischen einer adhäsiven Fraktur in Verbindung

mit einer Fraktur im Reparaturkomposit, zweitens, zwischen einer adhäsiven Fraktur in Verbindung mit einer Fraktur im Substrat und drittens, zwischen einer Fraktur im Reparaturkomposit in Verbindung mit einer Fraktur im Substrat unterschieden.

Frakturen die während der thermischen Alterung erfolgten wurden als Fehlversuch gewertet und die Kraft mit 0 MPa eingestuft und in der Statistik mitberücksichtigt.

Abbildung 6: Schema der verschiedenen Frakturbilder



Statistische Auswertung

Die gemessenen Werte wurden mithilfe der deskriptiven Statistik wie der Standardabweichung bei einem Konfidenzintervall von 95% (95% CI) analysiert. Die Normalität der Datenverteilung wurde mithilfe des Kolmogorov-Smirnov und Shapiro-Wilk-Tests bestimmt. Nach der vierfachen und einfachen Varianzanalyse (ANOVA) wurde der Scheffé post-hoc Test durchgeführt, um signifikante Unterschiede in der Oberflächenvorbehandlung und den Oberflächenkonditionierungen der Gruppen zu bestimmen.

Um den Einfluß der Reinigung mit Phosphorsäure oder den Einfluß des verwendeten Reparaturkomposites zu bestimmen wurde ein Zweistichproben t-Test durchgeführt. Relative Häufigkeiten der Frakturbilder zusammen mit dem Konfidenzintervall von 95% wurden nach den Ciba Geigy Tabellen vorausgesetzt.

Ein χ^2 -Test wurde dazu verwendet die Unterschiede in den Häufigkeiten der Frakturbilder der unterschiedlichen Gruppen zu bestimmen.

Zusätzlich wurde die Zugfestigkeit mithilfe der Weibull-Analyse berechnet. Die Parameter der Weibull Verteilung wurden mithilfe des parametrisches Schätzverfahrens der Maximum Likelihood Methode geschätzt und ihr Konfidenzintervall von 95% CI ermittelt.

Die statistischen Tests wurden mit der SPSS Version 20.0 (SPSS INC, Chicago, IL, US) durchgeführt.

Die Weibull Analyse wurde in MINITAB (Version 14, MINITAB, State College, PA, US) durchgeführt. P Werte kleiner als 0,05 wurden in allen Tests als statistisch signifikant angesehen.

5. Ergebnisse

Die Resultate der deskriptiven Statistik, wie die Haftfestigkeitsmittelwerte und Standardabweichungen, bezogen auf die verwendeten Reparaturkomposite und Oberflächenvorbehandlungen (in Spalten) sowie auf die verwendeten Adhäsive (in Zeilen) werden in folgender Tabelle 4 aufgeführt und in Abbildung 7 grafisch dargestellt.

Tabelle 4: Reparaturfestigkeitsmittelwerte und Standardabweichungen in MPa

Reparaturkomposit			Futurabond U	One Coat Bond	Scotchbond Universal	visio.link	Kontrollgruppe
GrandioSO	Cojet trocken	Säure	19,7 ± 6,1	12,8 ± 5,6	19,7 ± 5,6	20,1 ± 7,1	10,7 ± 5,2
			17,4 ± 7,5	14,7 ± 6,8	23,3 ± 5,9	18,8 ± 9,5	11,5 ± 5,6
	Cojet naß	Säure	17,5 ± 4,6	18,7 ± 5,7	20,8 ± 5,9	18,7 ± 3,9	11,2 ± 3,6
			15,1 ± 6,3	17,0 ± 7,2	19,4 ± 6,4	18,3 ± 4,8	11,3 ± 3,1
	Cimara	Säure	14,4 ± 6,4	10,8 ± 5,0	17,0 ± 7,1	18,2 ± 8,8	9,0 ± 4,8
			12,9 ± 5,6	13,2 ± 6,1	16,7 ± 6,3	14,5 ± 7,1	4,8 ± 5,5
Arabesk Top	Cojet trocken	Säure	20,3 ± 5,7	13,8 ± 3,9	19,3 ± 5,0	20,0 ± 4,8	8,8 ± 6,2
			16,4 ± 10,7	16,8 ± 5,5	21,4 ± 5,9	22,4 ± 8,2	13,3 ± 5,2
	Cojet naß	Säure	18,4 ± 5,2	12,1 ± 4,0	22,5 ± 6,0	21,2 ± 6,8	10,3 ± 4,4
			13,4 ± 3,4	16,2 ± 6,0	17,8 ± 4,6	21,8 ± 5,1	10,5 ± 3,4
	Cimara	Säure	18,2 ± 5,8	16,1 ± 4,3	21,4 ± 8,0	21,7 ± 7,9	8,3 ± 6,0
			17,0 ± 6,5	15,4 ± 7,6	18,9 ± 5,5	15,1 ± 7,0	9,1 ± 5,0

Legende der verwendeten Abkürzungen: GrandioSO = Verwendung von GrandioSO als Reparaturkomposit; Arabesk Top = Verwendung von Arabesk Top als Reparaturkomposit; Cojet trocken = Verwendung von Cojet trocken zur Oberflächenvorbehandlung; Cojet naß = Verwendung von Cojet naß zur Oberflächenvorbehandlung; Cimara = Verwendung von Cimara Schleifern zur Oberflächenvorbehandlung

Wie aus Tabelle 4 abzulesen, konnte der höchste Mittelwert für die Reparaturfestigkeit mit der Kombination Cojet trocken als Oberflächenvorbehandlung, Verwendung von Scotchbond Universal als Adhäsiv und GrandioSO als Reparaturkunststoff (23,3 MPa) erreicht werden. Dem folgte die Kombination von Cojet naß, anschließender Reinigung mit Phosphorsäure, Scotchbond Universal und Arabesk Top als Reparaturkunststoff (22,5 MPa). Der dritthöchste Mittelwert wurde mit Cojet trocken, visio.link und Arabesk Top gemessen (22,4 MPa). Die niedrigsten Reparaturfestigkeitsmittelwerte, ohne Berücksichtigung der Kontrollgruppen, wurden bei folgenden Reparaturen gemessen: Die Kombination von GrandioSo, Cojet trocken Reinigung mit Phosphorsäure und One Coat Bond als Adhäsiv schnitt am drittschlechtesten ab (12,8 MPa), gefolgt von der Kombination Cojet naß Phosphorsäurereinigung, Arabesk Top und One Coat Bond (12,1 MPa). Der niedrigste Reparaturfestigkeitsmittelwert zeigte sich bei der Verwendung von

Cimara-Schleifern mit anschließender Phosphorsäurereinigung, One Coat Bond als Adhäsiv und GrandioSo als Reparaturkomposit (10,8 MPa). Innerhalb der Kontrollgruppen, bei denen kein Adhäsiv zur Reparatur Verwendung fand, zeigten sich die beiden höchsten Reparaturfestigkeitsmittelwerte bei folgenden Gruppen: der höchste fand sich bei der Kombination von Cojet trocken, ohne Phosphorsäurereinigung und Arabesk Top (13,3 MPa), gefolgt von der Kombination von Cojet trocken ohne Phosphorsäurereinigung und dem Reparaturkunststoff GrandioSO (11,5 MPa). Dagegen fanden sich innerhalb der Kontrollgruppen die niedrigsten Reparaturfestigkeitsmittelwerte, bei der Gruppe in der Cimara-Schleifer, Phosphorsäurereinigung, und Arabesk Top zur Anwendung kamen (8,3 MPa), und bei der Gruppe in der Cimara-Schleifer, keine Phosphorsäurereinigung und GrandioSO verwendet wurde (4,8 MPa).

Der höchste Einfluß auf die Zugfestigkeit zeigte sich bei der Wahl der Oberflächenkonditionierung (partielles Eta-Quadrat $\eta_p^2 = 0,273$, $p < 0,05$), gefolgt von der Wahl des Reparaturkomposites ($\eta_p^2 = 0,07$, $p < 0,05$) und der Methode der Oberflächenvorbehandlung ($\eta_p^2 = 0,032$, $p < 0,05$), während die Säurekontamination nach der Oberflächenvorbehandlung keinen signifikanten Einfluß auf die Zugfestigkeit hatte ($p = 0,154$). Der Effekt der binären, ternären und quartären Kombination der vier Parameter war nur signifikant für die Kombination von Oberflächenvorbehandlung in Verbindung mit Säurekombination ($\eta_p^2 = 0,011$, $p < 0,05$), Oberflächenvorbehandlung in Verbindung mit der Wahl des Reparaturkomposites ($\eta_p^2 = 0,015$, $p < 0,05$) und die Verbindung von Oberflächenkonditionierung und Säurekontamination ($\eta_p^2 = 0,015$, $p < 0,05$). In folgender Tabelle 5 sind die eben beschriebenen Einflußfaktoren auf die Reparaturfestigkeit angegeben und ob diese signifikant waren.

Tabelle 5: Übersicht der Einflußfaktoren auf die Zughaftfestigkeit

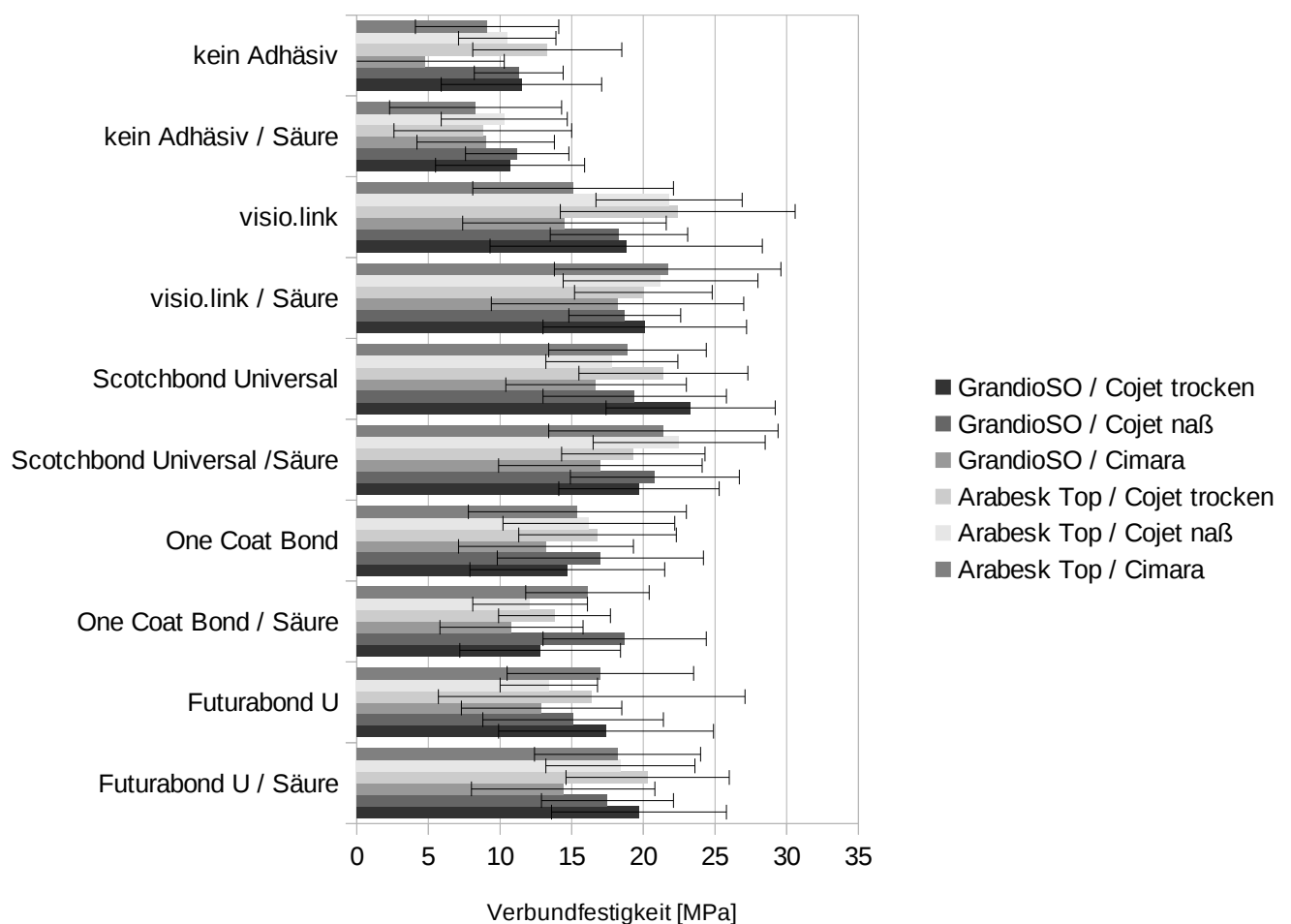
Parameter	partielles Eta Quadrat	Signifikanz
Oberflächenkonditionierung	0,273	+
Reparaturkomposit	0,07	+
Oberflächenvorbehandlung	0,032	+
Säurekontamination	0,154	n.s
Oberflächenvorbehandlung+Säure	0,011	+
Oberflächenvorbehandlung+Reparaturkomposit	0,015	+

Signifikanzniveau=0,05, + = signifikant, n.s = nicht signifikant

Die Konditionierungsmethode betreffend, wurde die signifikant niedrigste Zugfestigkeit erreicht, wenn keine Oberflächenkonditionierung erfolgte. Dem folgte die Konditionierung mit den

Adhäsiven One Coat Bond und Futurabond U. Die signifikant höchsten Zughaftfestigkeiten wurden mit den Adhäsiven visio.link und Scotchbond Universal erreicht. Bei der Wahl der Reparaturkomposite zeigten sich wenig, jedoch signifikant höhere Reparaturfestigkeiten wenn Arabesk Top zur Reparatur verwendet wurde. Die signifikant höchsten Werte der Reparaturfestigkeit bei den drei verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen zeigten sich bei der Bestrahlung mit Cojet, wobei es keine signifikanten Unterschiede zwischen Cojet trocken und Cojet naß gab. Beide Oberflächenvorbehandlungen mit Cojet (trocken und naß) zeigten signifikant höhere Haftwerte als die Bearbeitung der Oberfläche mit den Cimara Schleifern. Die vierfache Varianzanalyse der Effekte war signifikant ($p < 0,011$). Deshalb können die einzelnen Effekte der Oberflächenvorbehandlung, die Verwendung von Phosphorsäure, die Wahl des Adhäsivsystems und die Wahl des Reparaturkomposites nicht direkt miteinander verglichen werden, weil die Interaktionswerte höherer Ordnung signifikant waren. Deshalb wurden verschiedene Analysen durchlaufen und, je nach Fragestellung, in die Bereiche Oberflächenvorbehandlung, Verwendung von Phosphorsäure, Adhäsivsystem und Wahl des Reparaturkomposites unterteilt.

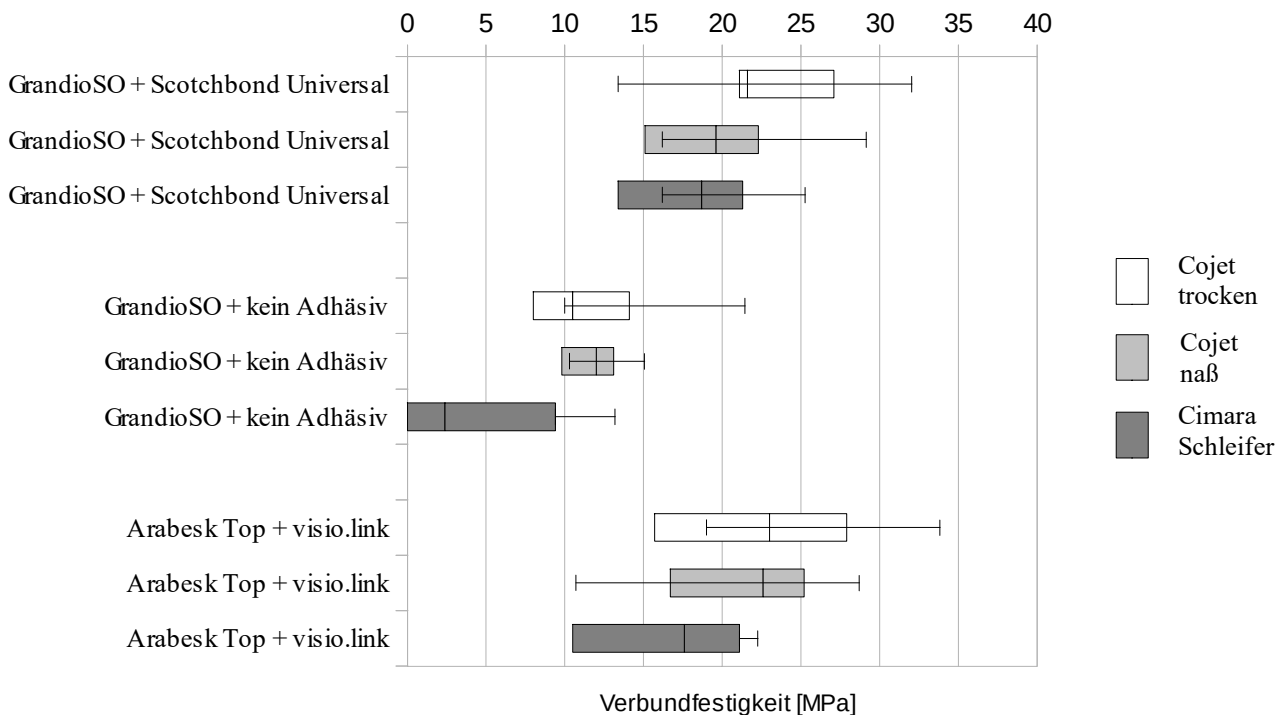
Abbildung 7: Übersicht über die Ergebnisse des Zugversuchs



Einfluß der Oberflächenvorbehandlung

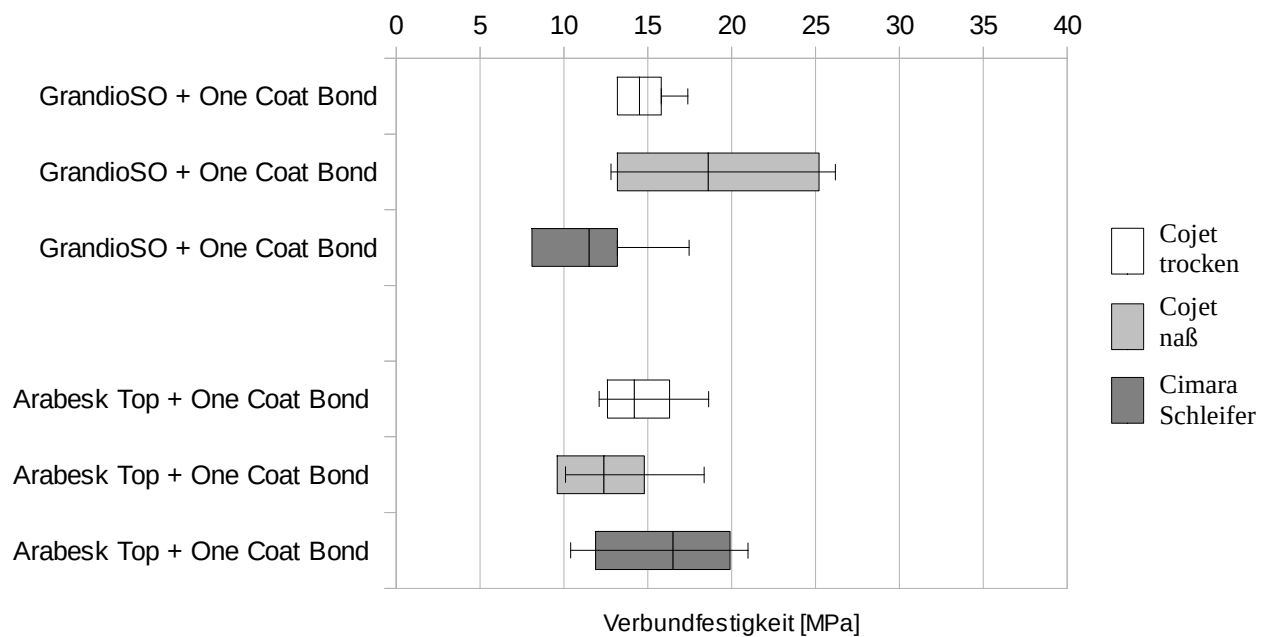
Die folgenden Abbildungen stellen jene Gruppen grafisch dar bei denen signifikante Unterschiede der Verbundfestigkeit und deren Verteilung, bezogen auf die unterschiedlichen Oberflächenvorbehandlungen, gemessen wurden.

Abbildung 8: Verteilung der Verbundfestigkeitswerte auf die Oberflächenvorbehandlungen bei Gruppen ohne Säurereinigung



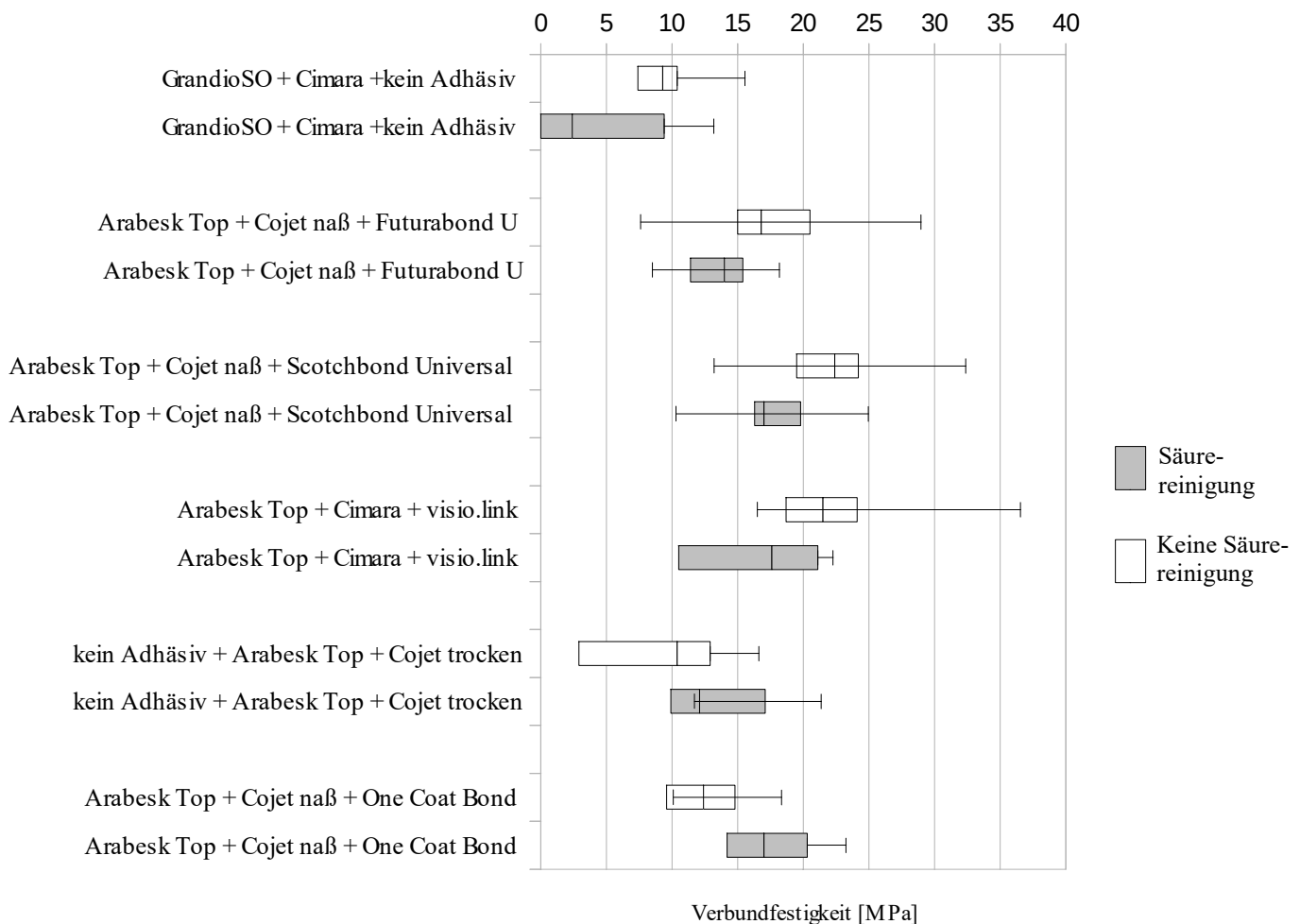
Gruppen ohne Säurereinigung, in denen GrandioSO als Reparaturkunststoff und das Adhäsiv Scotchbond Universal verwendet wurde, zeigten nach der Oberflächenvorbehandlung mit Cimara Schleifern signifikant niedrigere Haftwerte als Gruppen bei denen die Oberflächenvorbehandlung mit Cojet (trocken und naß) erfolgte ($p = 0,019$). Die gleiche Beobachtung konnte in den Gruppen gemacht werden bei denen kein Adhäsivsystem verwendet und mit dem Komposit GrandioSO repariert wurde ($p < 0,001$). Auch in Gruppen, bei denen das Adhäsiv visio.link verwendet wurde und Arabesk Top als Reparaturkomposit diente, zeigten sich signifikant niedrigere Zughaftfestigkeitswerte bei Anwendung von Cimara Schleifern zur Oberflächenvorbehandlung als bei Verwendung von Cojet naß oder Cojet trocken ($p = 0,009$).

Abbildung 9: Verteilung der Verbundfestigkeitswerte auf die Oberflächenvorbehandlungen bei Gruppen mit Säurereinigung



Bei den Gruppen mit Säurereinigung zeigte sich ein signifikanter Einfluß der Oberflächenvorbehandlung nur bei Gruppen, in denen One Coat Bond zur Konditionierung verwendet wurde. Innerhalb dieser Gruppen zeigten sich in Kombination mit GrandioSO als Reparaturkomposit signifikant höhere Zugfestigkeiten bei der Oberflächenvorbehandlung mit Cojet naß, verglichen mit den beiden anderen Oberflächenvorbehandlungen ($p = 0,01$). Diente Arabesk Top als Reparaturkomposit, zeigten die Gruppen die mit Cimara Schleifern bearbeitet wurden signifikant höhere Zughaftfestigkeitswerte, als die mit CoJet naß korundgestrahlten Gruppen ($p = 0,036$).

Abbildung 10: Verteilung der Verbundfestigkeiten auf die Gruppen mit und ohne Säurereinigung

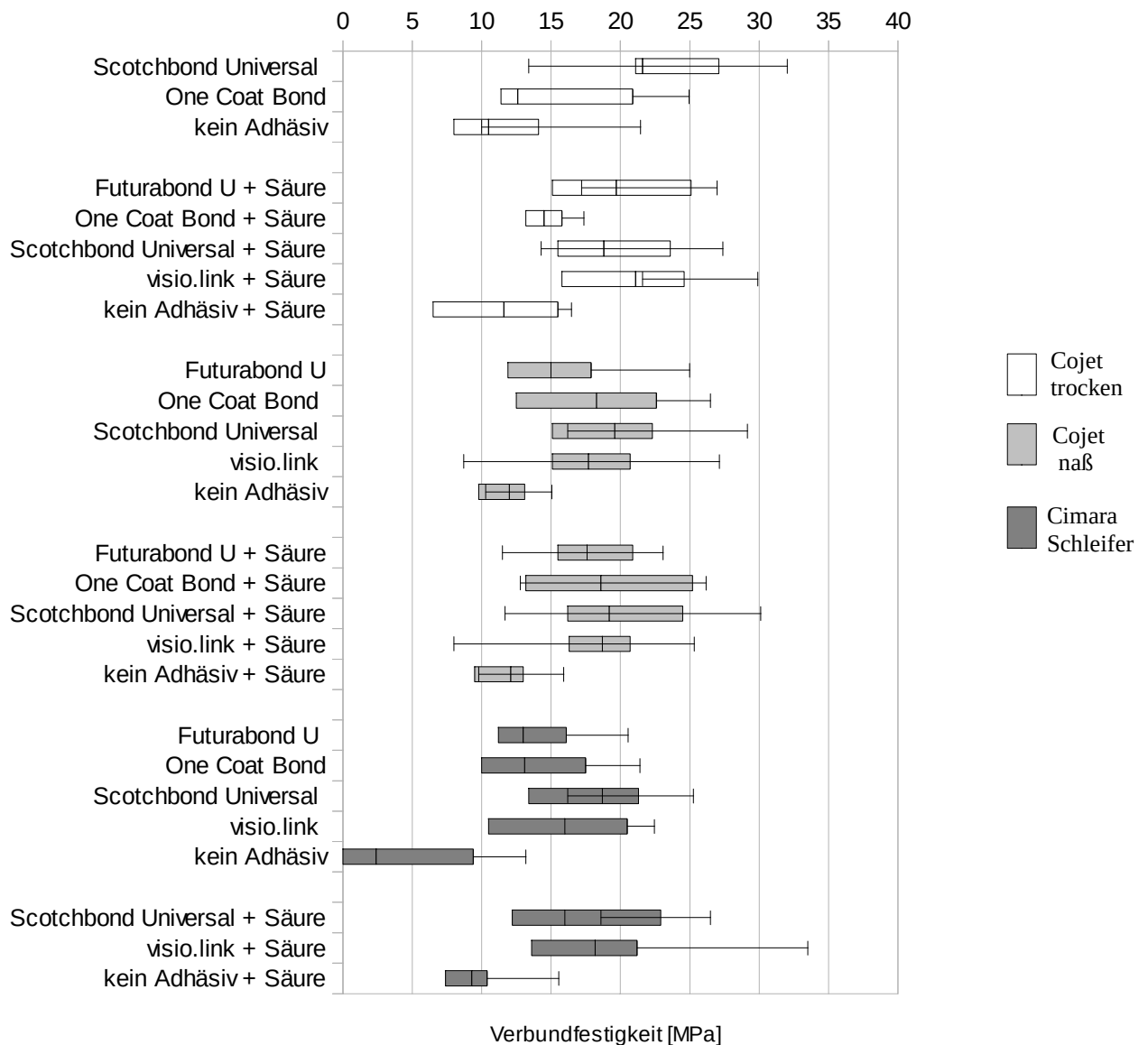


In den Gruppen mit Säurereinigung wurden keine einheitlichen Ergebnisse gefunden. In den Gruppen die mit GrandioSO repariert wurden, erreichten die Prüfkörper welche mit Cimara Schleifern bearbeitet wurden, ohne weitere Konditionierung signifikant niedrigere Haftwerte nach Säurebehandlung als ohne Säurebehandlung ($p = 0,033$). Unter den Gruppen die mit Arabesk Top repariert wurden, konnte mit der Säurebehandlung ein negativer Effekt bei den Gruppen mit Cojet naß Vorbehandlung und Futurabond U Konditionierung ($p = 0,005$), Scotchbond Universal Konditionierung ($p = 0,023$), sowie für Gruppen mit Cimara Schleifer Vorbehandlung und Visio.link Anwendung ($p = 0,021$), beobachtet werden. Ein positiver Effekt der Säurebehandlung konnte bei Gruppen mit CoJet trocken Vorbehandlung ohne Konditionierung ($p = 0,04$) und CoJet naß in Kombination mit One Coat Bond ($p = 0,036$) gemessen werden. Bei den verbliebenen

Gruppen zeigte sich kein Einfluß der Säurebehandlung auf die Zugfestigkeit ($p > 0,05$).

Einfluß der Haftvermittler

Abbildung 11: Verteilung der Verbundfestigkeiten auf die verschiedenen Adhäsive bei Verwendung von GrandioSO als Reparaturkomposit



Unter den Cojet trocken korundgestrahlten und nicht mit Säure gereinigten Gruppen wurden signifikant höhere Haftwerte erzielt, wenn Scotchbond Universal als Konditionierung verwendet wurde, als bei nicht konditionierten, sowie Gruppen die mit One Coat Bond behandelt wurden ($p < 0,001$). Nach Säurebehandlung und Konditionierung mit One Coat Bond und ohne Konditionierung wurden signifikant niedrigere Haftwerte erzielt als bei der Konditionierung mit Futurabond U,

Scotchbond Universal oder Visio.link ($p < 0,001$). Innerhalb der Gruppen, welche mit Cojet naß korundgestrahlt wurden und nicht mit Säure gereinigt wurden, zeigten sich signifikant höhere Zughaftfestigkeiten,

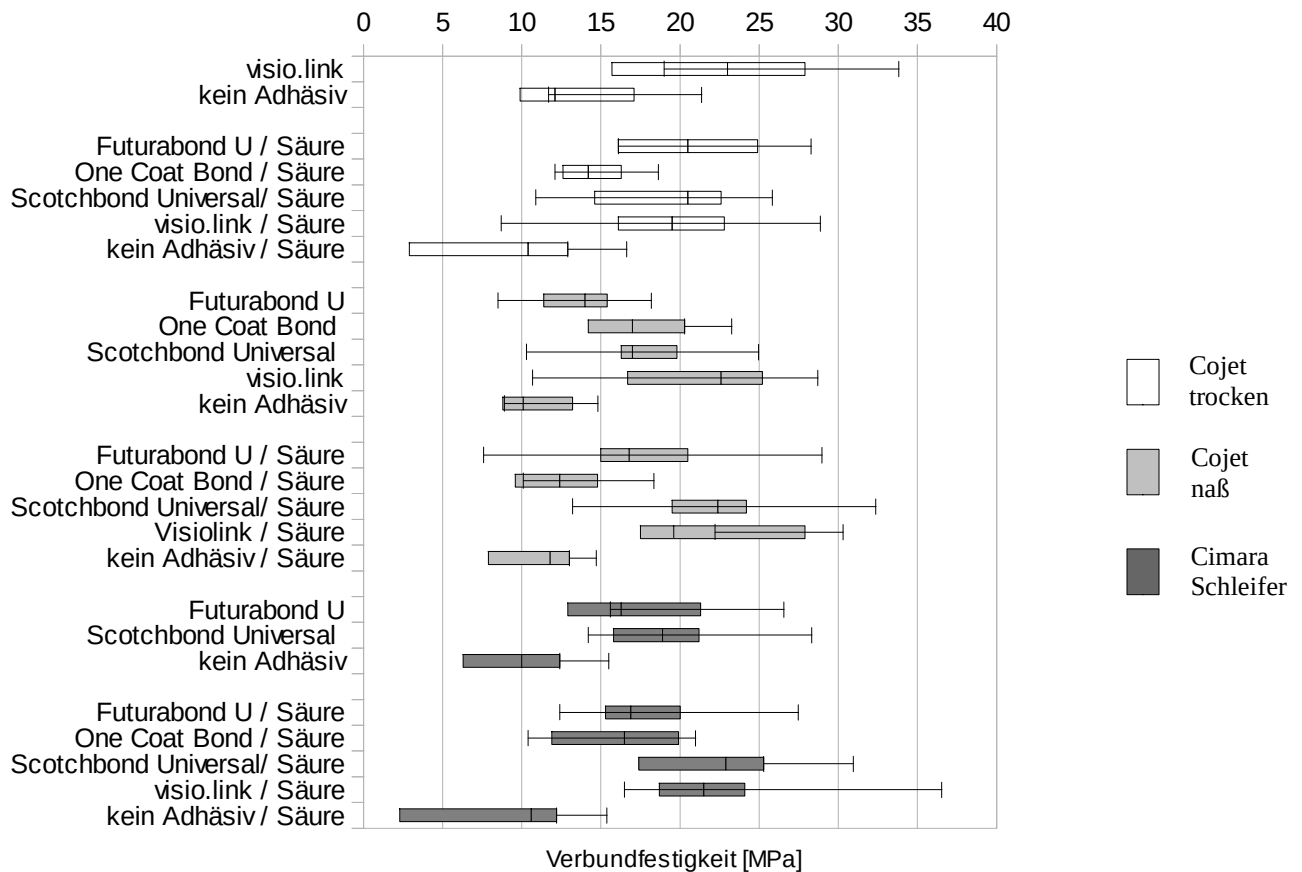
wenn ein Adhäsiv zur Konditionierung herangezogen wurde als bei den nicht konditionierten Gruppen ($p = 0,002$). In den mit Säure gereinigten Gruppen zeigten die nicht konditionierten Gruppen die niedrigsten Zugfestigkeiten ($p < 0,001$). Die verbliebenen Konditionierungsmethoden zeigten keine Unterschiede ($p > 0,05$). Bei den Gruppen welche mit Cimara Schleifern bearbeitet und nicht säuregereinigt wurden, zeigten nicht konditionierte Gruppen niedrigere Resultate als konditionierte ($p < 0,001$). Innerhalb der säurebehandelten Gruppen wurden signifikant höhere Zugfestigkeiten bei der Anwendung von Scotchbond Universal und visio.link gefunden, verglichen mit der nicht-konditionierter Gruppen ($p = 0,001$).

Arabesk Top

Unter den CoJet trocken korundgestrahlten Gruppen, die nicht mit Säure gereinigt wurden, zeigten mit visio.link konditionierte Gruppen höhere Zugfestigkeiten als nicht konditionierte Gruppen ($p = 0,006$). Unter den säuregereinigten Gruppen zeigten nicht konditionierte Gruppen signifikant niedrigere Zugfestigkeiten als Gruppen welche mit Scotchbond Universal konditioniert wurden ($p < 0,001$). Eine Konditionierung mit visio.link und Futurabond U bewirkte signifikant höhere Zugfestigkeiten als nicht-konditionierte Gruppen oder solche die mit One Coat Bond behandelt wurden ($p < 0,001$).

Die CoJet naß vorbehandelten und nicht säurebehandelte Gruppen zeigten signifikant niedrigere Werte ohne Konditionierung, als solche die mit One Coat Bond und Scotchbond Universal behandelt wurden, und signifikant höhere Zugfestigkeiten nach Konditionierung mit visio.link als ohne Konditionierung, Konditionierung mit One Coat Bond oder Futurabond U ($p < 0,001$). In den säurebehandelten Gruppen hingegen zeigte eine fehlende Konditionierung, als auch eine Konditionierung mit One Coat Bond eine signifikant niedrigere Zugfestigkeit als eine Konditionierung mit Futurabond U, Visio.link, oder Scotchbond Universal ($p < 0,001$).

Abbildung 12: Verteilung der Verbundfestigkeiten auf die verschiedenen Adhäsive bei Verwendung von Arabesk Top als Reparaturkomposit



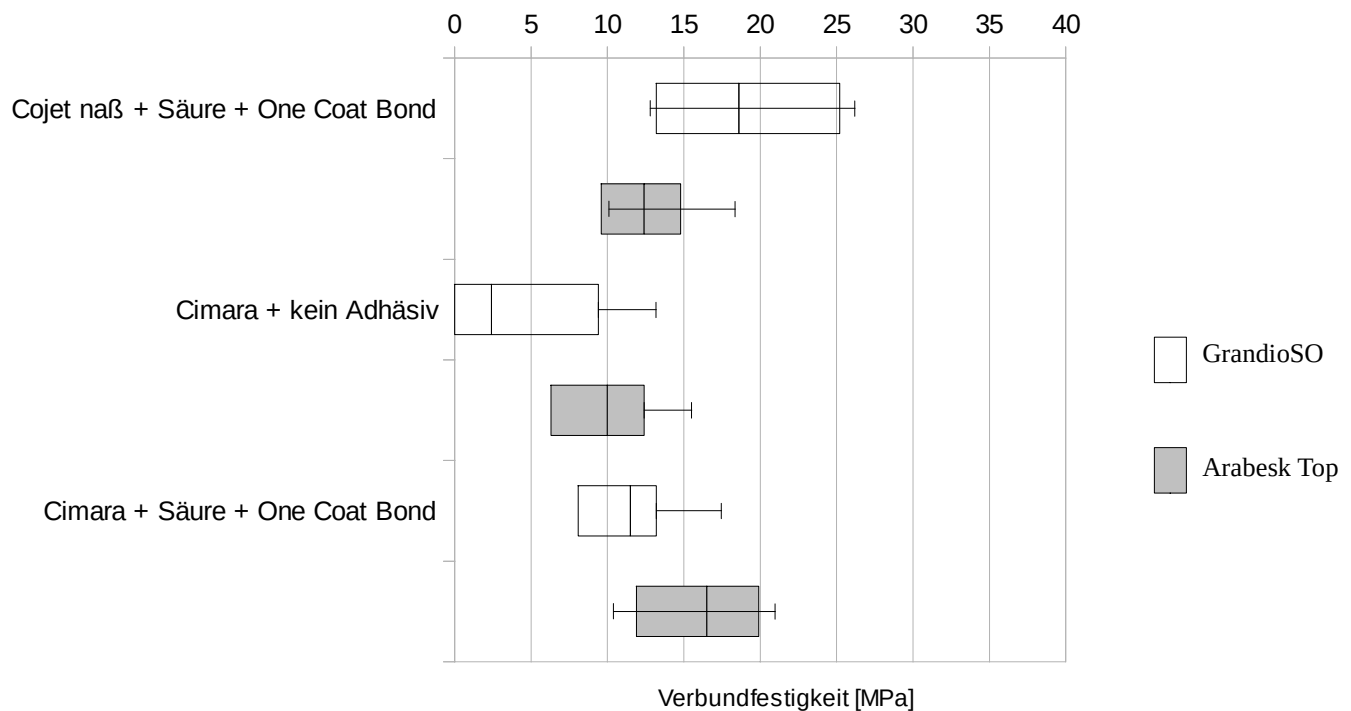
Die Cimara Schleifer Gruppe ohne Säurebehandlung und ohne Konditionierung zeigte signifikant niedrigere Werte als die Gruppen mit Futurabond U oder Scotchbond Universal ($p = 0,001$). Unter den säurebehandelten Gruppen zeigte die nicht-konditionierte Gruppe signifikant niedrigere Werte ($p < 0,001$). Die Konditionierungsmethoden zeigten innerhalb der säurebehandelten Gruppe keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$).

Einfluß der Reparaturkomposite

Gruppen mit CoJet naß als Oberflächenvorbehandlung, nach Säurereinigung und Konditionierung mit One Coat Bond, zeigten signifikant höhere Zugfestigkeiten, wenn als Reparaturkomposit

GrandioSO statt Arabesk Top verwendet wurde ($p = 0,001$). Arabesk Top als Reparaturmaterial resultierte in signifikant höheren Zugfestigkeiten als GrandioSO in den Cimara Gruppen welche keine Säurereinigung erfuhren und kein Adhäsiv verwendet wurde ($p = 0,033$) als auch in den säurebehandelten und mit One Coat Bond konditionierten Gruppen ($p = 0,004$). Auf alle anderen Gruppen zeigte die Wahl des Reparaturkomposites keinen Einfluß.

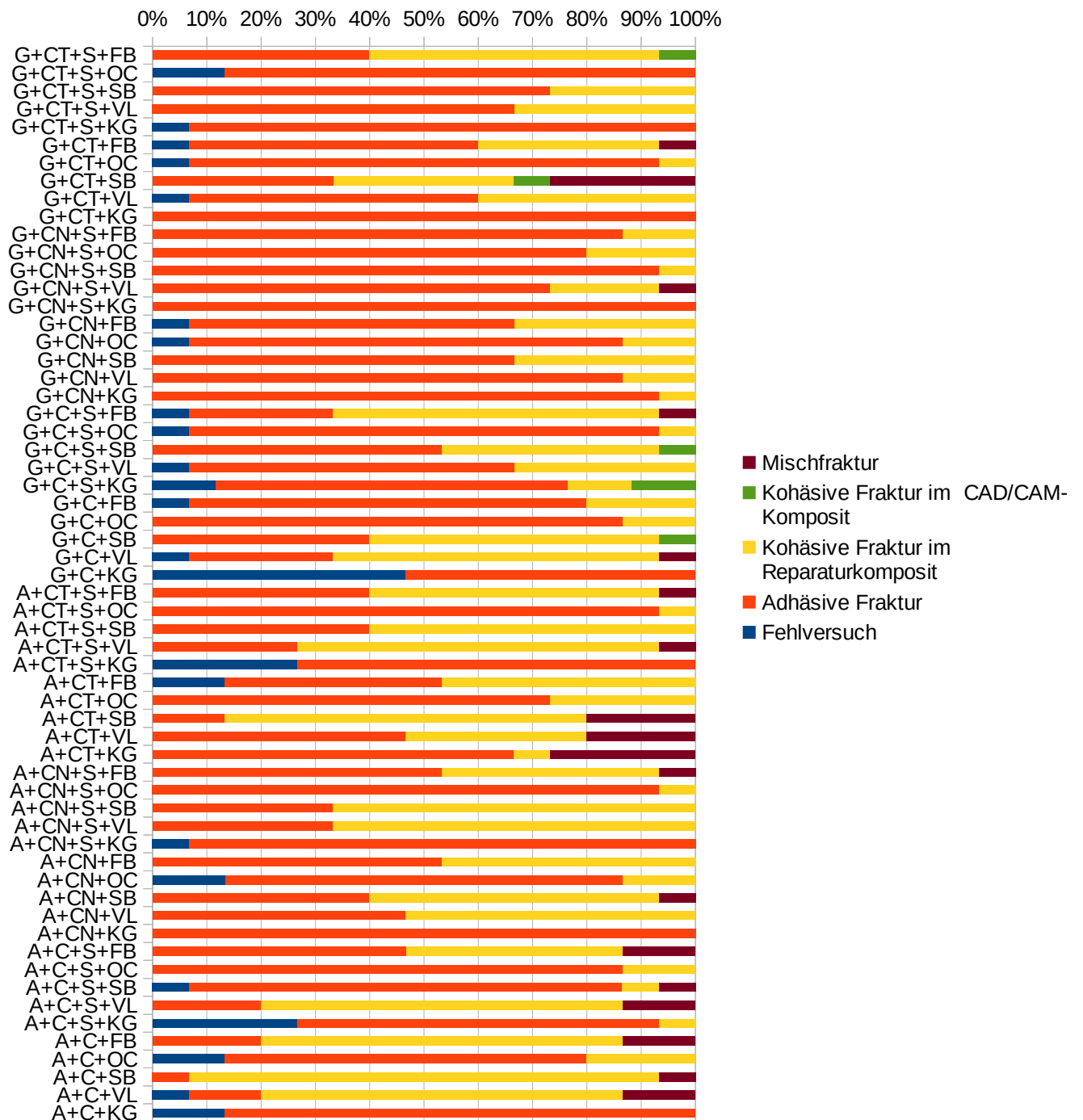
Abbildung 13: Einfluß der Reparaturkomposite auf die Verbundfestigkeit



Frakturbilder

Alle Gruppen zeigten überwiegend adhäsive (13.3-100%) oder kohäsive Frakturen in ihren Reparaturkompositen (0-86.7%). Kohäsive Frakturen im CAD/CAM-Komposit, gemischte Frakturen und Fehlversuche wurden selten beobachtet.

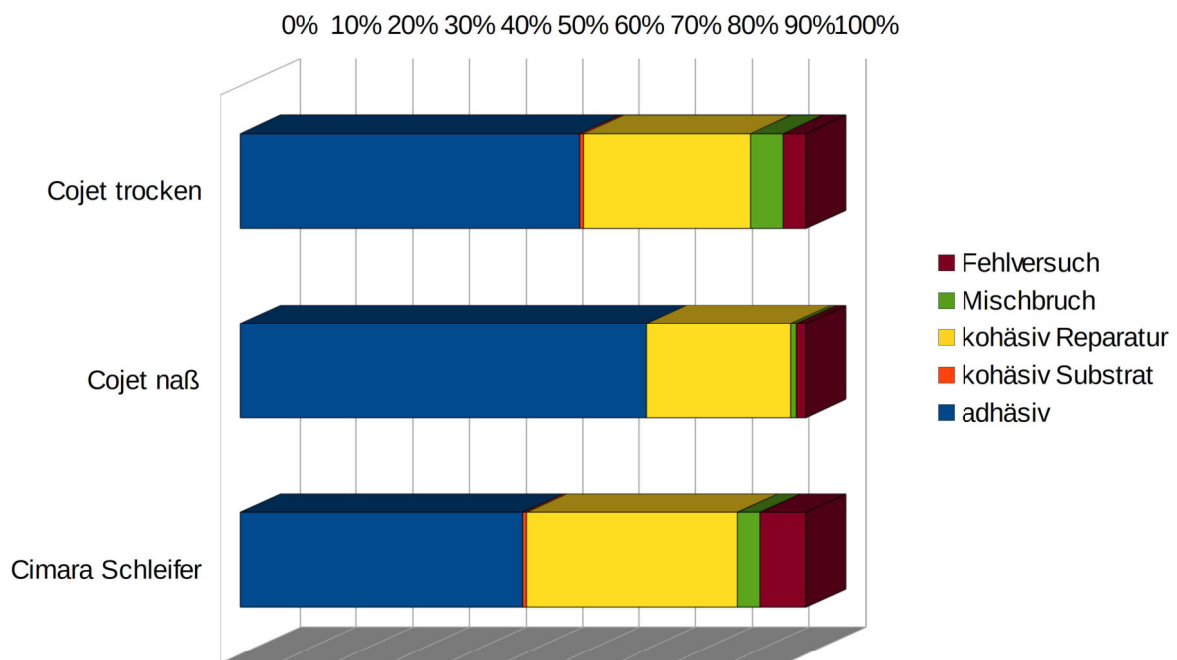
Abbildung 14: Übersicht über die Häufigkeit der Frakturbilder innerhalb der Gruppen



Legende der verwendeten Abkürzungen: G = GrandioSO, A = Arabesk Top, CT = Cojet trocken, CN = Cojet naß, C = Cimara Schleifkörper, S = Säurereinigung, FB = Futurabond U, OC = One Coat Bond, SB = Scotchbond Universal, VL = visio.link, KG = Kontrollgruppe

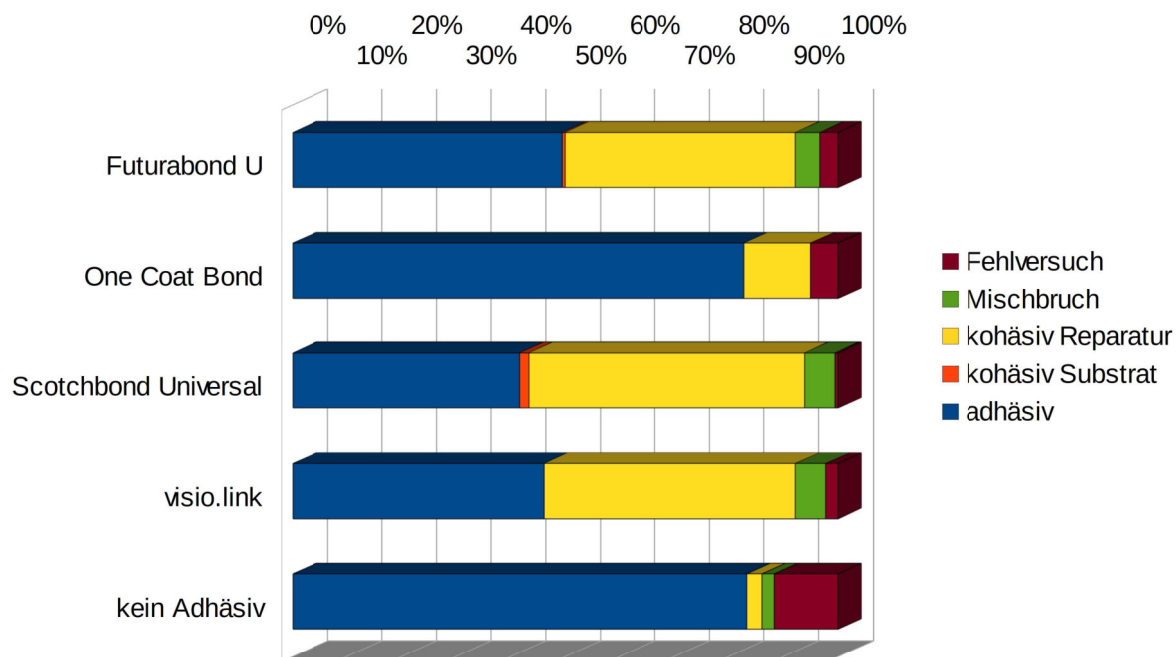
Abbildung 15 beschreibt die Verteilung der Frakturbilder auf die verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen. Es wird deutlich dass innerhalb der Cojet naß korundgestrahlten Gruppen, die meisten adhäsiven Frakturen beobachtet werden konnten (72%). Dem folgten die Gruppen mit Cojet trocken Oberflächenvorbehandlung (60%) und schließlich Gruppen in denen Cimara Schleifer (50 %) verwendet wurden. Die meisten kohäsiven Frakturen im Reparaturkomposit traten bei den Cimara Gruppen (37%) auf, die wenigsten bei den Cojet naß korundgestrahlten (25%).

Abbildung 15: Verteilung der Frakturbilder auf die drei Arten der Oberflächenvorbehandlung



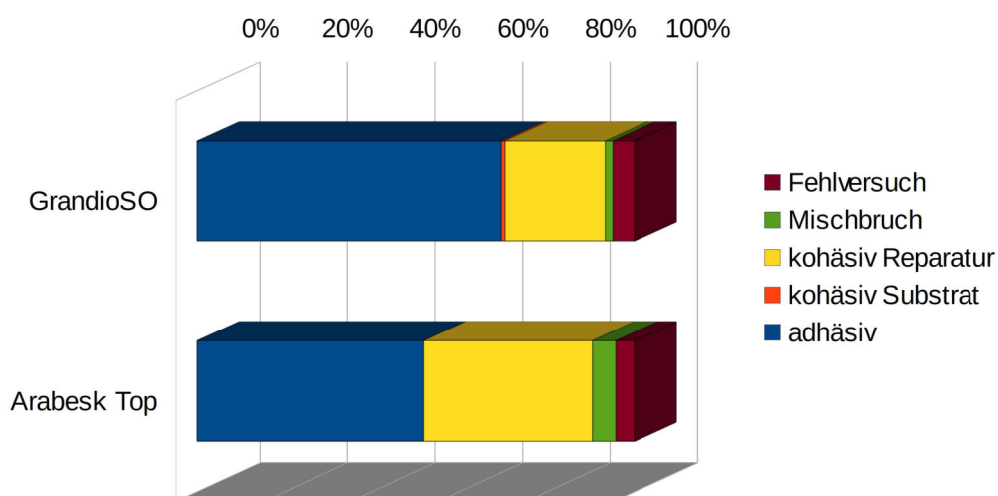
Betrachtet man die Verteilung der Frakturbilder auf die verschiedenen verwendeten Adhäsive so zeigen sich die meisten adhäsiven Frakturen bei der Verwendung von One Coat Bond (83%) und in den Kontrollgruppen bei denen kein Adhäsiv verwendet wurde (83%). Die meisten kohäsiven Frakturen im Reparaturkomposit traten bei den Gruppen auf, in denen visio.link (46%) und Scotchbond Universal (51%) verwendet wurde (siehe Abbildung 16).

Abbildung 16: Verteilung der Frakturbilder auf die verschiedenen Adhäsive



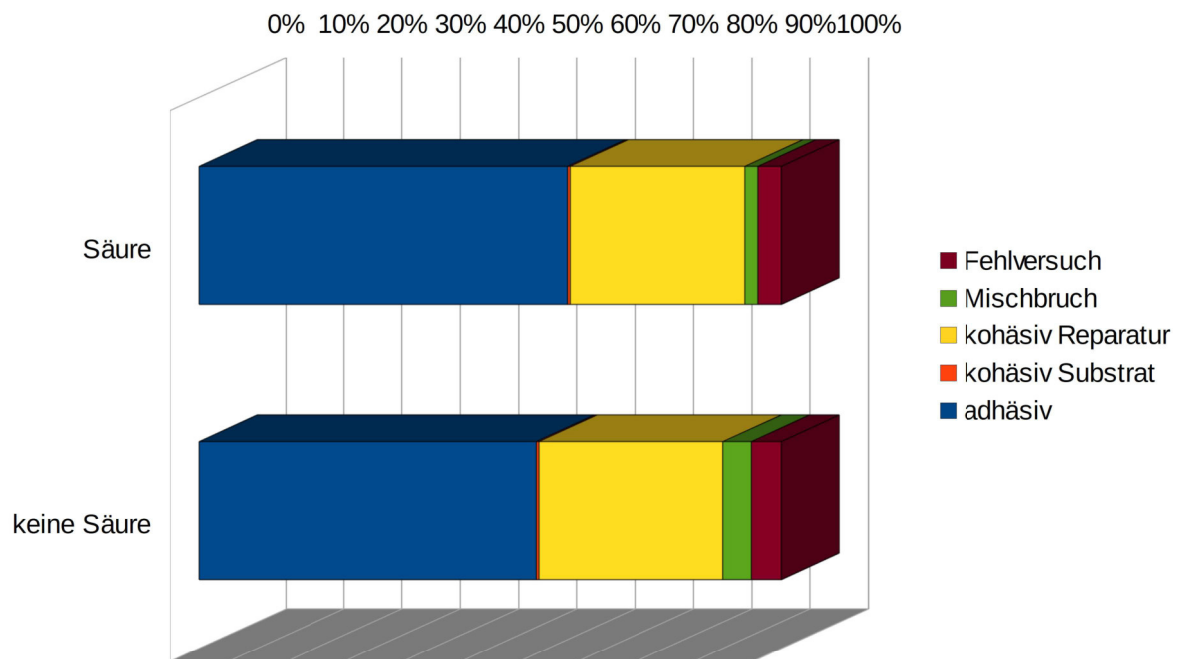
In Abbildung 17 wird die Verteilung der Frakturbilder auf die zwei verwendeten Reparaturkomposite dargestellt. Es fällt auf, dass mehr adhäsive Frakturen bei Gruppen mit GrandioSO (70%) als Reparaturmaterial auftraten. In den Gruppen mit Arabesk Top traten mehr kohäsive Frakturen (39%) im Reparaturkomposit auf.

Abbildung 17: Verteilung der Frakturbilder auf die zwei verwendeten Reparaturkomposite



Erfolgte nach der Oberflächenvorbehandlung eine Säurereinigung traten mehr adhäsive Frakturen (63%) auf, als in Gruppen ohne Säurereinigung (58%). In Gruppen ohne Säurereinigung traten mehr kohäsive Frakturen im Reparaturkomposit auf (32%). Dies wird in Abbildung 18 veranschaulicht.

Abbildung 18: Verteilung der Frakturbilder auf säuregereinigte- und nicht-säuregereinigte Gruppen



Weibull Analyse

Die zuverlässigsten Werte konnten in der mit dem Komposit GrandioSO reparierten Gruppe gemessen werden, in der mit Cojet naß korundgestrahlt wurde, eine Säurereinigung erfolgte sowie mit visio.link konditioniert wurde. Dem folgte die Gruppe mit der Kombination Arabesk Top als Reparaturkomposit, Cojet naß Oberflächenvorbehandlung, keiner Säurereinigung und visio.link als Adhäsiv. Der niedrigste Weibull Parameter wurde bei der mit Cimara Schleifern bearbeiteten, nicht säurebehandelten, nicht-konditionierten, und mit GrandioSO reparierten Gruppen beobachtet.

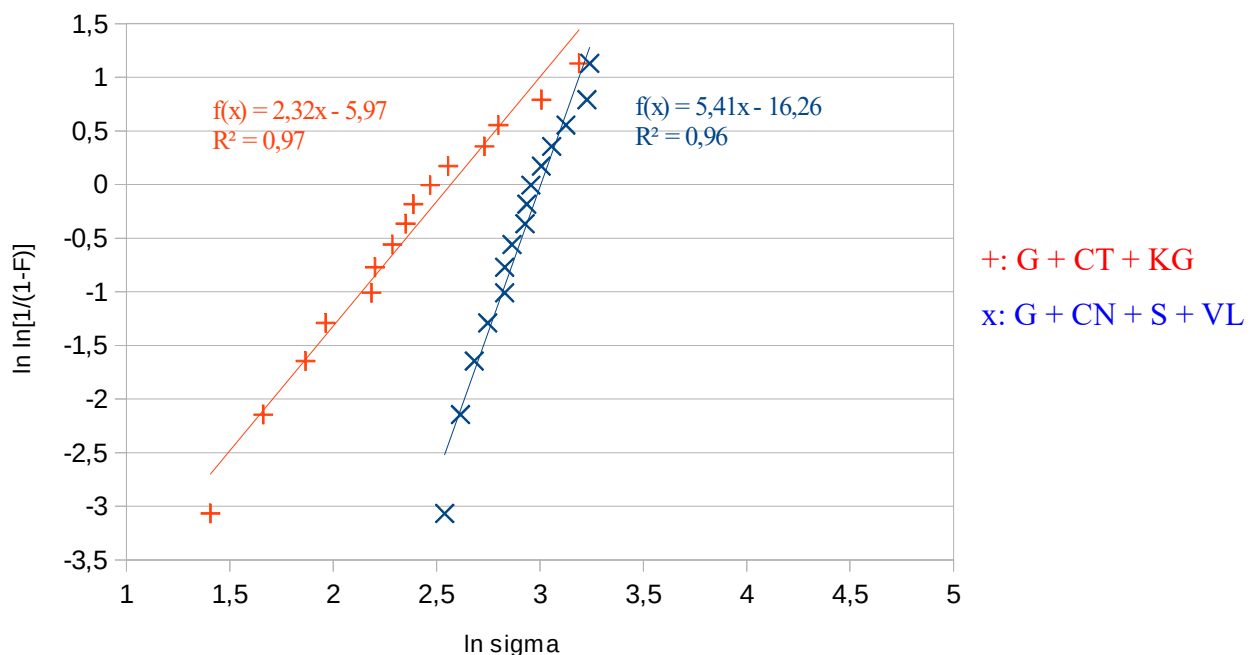
Durch das Vorkommen einiger Fehlversuche, welche mit einer Zughaftfestigkeit von 0 bewertet wurden, kam es in den betroffenen Gruppen zu einem reduzierten Weibull Modulus.

Tabelle 6: Überblick der durch Weibull-Statistik ermittelten m-Werte

GrandioSO	Cojet trocken	Säure	3,9	0,6	3,9	3,3	1,1
			1,1	1,1	4,4	1,0	2,3
	Cojet naß	Säure	4,7	3,8	3,9	5,4	3,7
			1,1	1,1	3,5	4,1	4,8
	Cimara	Säure	1,1	1,1	2,8	1,1	0,6
			1,1	1,1	3,2	1,0	0,2
Arabesk Top	Cojet trocken	Säure	4,3	4,6	4,6	4,5	0,3
			0,6	3,7	4,3	3,2	2,9
	Cojet naß	Säure	3,7	3,5	3,9	3,6	1,1
			4,7	1,2	4,4	5,1	3,7
	Cimara	Säure	3,3	4,7	1,1	3,1	0,3
			3,0	0,6	3,9	1,1	0,6

Legende der verwendeten Abkürzungen: FB = Futurabond U; OC= One Coat Bond; SB = Scotchbond Universal; VL = visio.link; KG = Kontrollgruppe ohne Adhäsiv; GrandioSO = Verwendung von GrandioSO als Reparaturkomposit; Arabesk Top = Verwendung von Arabesk Top als Reparaturkomposit; Cojet trocken = Verwendung von Cojet trocken zur Oberflächenvorbehandlung; Cojet naß = Verwendung von Cojet naß zur Oberflächenvorbehandlung; Cimara = Verwendung von Cimara Schleifern zur Oberflächenvorbehandlung

Abbildung 19 : Exemplarische Darstellung der Weibull-Verteilung der Kombinationen von GrandioSO, Cojet naß Säurereinigung und visio.link (hohe Zuverlässigkeit) und GrandioSO, Cojet trocken, kein Adhäsiv (geringere Zuverlässigkeit)



Legende der verwendeten Abkürzungen: G + CT + KG = Kombination von GrandioSO, Cojet trocken und keinem Adhäsiv; G + CN + S + VL = Kombination von GrandioSO, Cojet naß, Säurereinigung und visio.link

6. Diskussion

Mithilfe der CAD/CAM-Technologie eröffnet sich die Möglichkeit zahnärztliche Restaurationen nicht nur zeit- sondern auch kosteneffektiver herzustellen. Als Alternative zu Keramiken wurden in letzter Zeit industriell polymerisierte Komposite für die zahnärztliche Anwendung auf den Markt gebracht [13]. Diese ermöglichen es unter anderem Restaurationen mit dünneren Schichtstärken herzustellen, als dies bei Keramikrestaurationen, ohne eine erhöhte Frakturgefahr, realisierbar ist.

Die Art der Polymerisation hat einen grundlegenden Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften solcher Komposite [73], weshalb sie vor deren Verbesserungen überwiegend als temporäre zahnärztliche Versorgung Anwendung fanden [1].

Durch die Polymerisation unter hohem Druck und hoher Temperatur konnten die mechanischen Eigenschaften der Komposite verbessert werden, und diese sind nun auch seit kurzem von Seiten der Hersteller als Material für zahnmedizinische Langzeitversorgungen freigegeben. Um der Forderung nach einer minimalinvasiven Zahnheilkunde nachzukommen, muss es möglich sein kleine Frakturen, beziehungsweise durch Verschleiß des Materials entstandene Defekte effizient und dauerhaft zu reparieren, ohne die Restauration im Ganzen, mit der Gefahr der Schädigung natürlicher Zahnhartsustanz beziehungsweise des Parodontiums, zu erneuern. CAD/CAM-Komposite lassen hier auf ein sichereres Reparaturprocedere hoffen, da bei ihrer Reparatur auf die mit Risiken behaftete intraorale Reparatur mit Flusssäure verzichtet werden kann. Um die intraorale Reparatur von dentalen Kompositen zu vereinfachen sind in neuerer Zeit Universaladhäsivsysteme mit weniger Applikationsschritten, auf den Markt gebracht worden. Sie beinhalten in ihrer chemischen Zusammensetzung neben Methacrylatmonomeren zusätzlich Silan- oder Phosphatmonomere die es ihnen ermöglichen sollen einen Verbund zu unterschiedlichen zahnärztlich verwendeten Materialien herzustellen.

Das Ziel dieser Arbeit war es die Effizienz der Reparatur von künstlich gealterten CAD/CAM-Kompositsubstraten mithilfe verschiedener Haftvermittler sowie unterschiedlichen Kompositen als Reparaturmaterial nach unterschiedlichen Vorbehandlungen der Oberfläche zu untersuchen.

6.1. Diskussion von Material und Methode

Ziel einer in-vitro-Untersuchung ist es die Bedingungen, welche im intraoralen Mileu vorherrschen möglichst detailgetreu unter Laborbedingungen nachzuahmen. Da sich jedoch jeder Werkstoff intraoral anders verhält als unter artifiziellen Laborbedingungen, ist es schwierig reproduzierbare und somit klinisch vergleichbare Untersuchungen umzusetzen. Man verlässt sich auf die im Laborversuch gemessenen Werte, dessen Bedingungen möglichst klinikgetreu gestaltet werden.

Durch die nicht sehr lange zurückliegende Einführung der CAD/CAM-Komposite in die Zahnheilkunde gibt es bis dato wenig vergleichbare Studien zur Reparatur dieses Materials. Die vielfältigen Erkenntnisse aus den Forschungsarbeiten zum Thema der Reparatur von Kompositrestaurationen, gaben der vorliegenden Arbeit eine Orientierung bezüglich der Auswahl der Materialien sowie der Methodik.

Das in dieser Studie verwendete CAD/CAM-Komposit besitzt ein breites Indikationsspektrum restaurativer und prothetischer Art. Dies beinhaltet auch die Verwendung als Material für definitive zahnärztliche Langzeitrestaurationen [18]. Dadurch steigt der Forschungsbedarf an Reparaturmöglichkeiten dieses neuen Materials.

Durch die industrielle Polymerisation der CAD/CAM-Komposite und der damit hohen Konversionsrate verbleiben wenige freie Kohlenstoffdoppelbindungen auf der Substratoberfläche [56]. Dies beeinträchtigt die Adhäsion der neuen Schicht des Restaurationskomposites. Es erscheint daher sinnvoll einen Haftvermittler aufzutragen, der in die vorbehandelte Oberfläche penetrieren kann und eine Schicht bildet, die es dem Reparaturkomposit ermöglicht an diese zu binden [69]. Eine wichtige Fragestellung innerhalb dieser Studie war, inwieweit die Applikation eines Adhäsivs die Reparaturfestigkeit beeinflusst. Ausgewählt wurden drei sogenannte Universalreparaturadhäsive: Scotchbond Universal, visio.link und Futurabond U. Diese Adhäsive wurden auf den Markt gebracht um das Reparaturprocedere einfacher zu gestalten und die notwendigen Einzelschritte, die mit Fehlern behaftet sein können, auf ein Minimum zu beschränken. Ihre Zusammensetzungen wurden, neben den gewöhnlichen Methacrylatmonomeren, um Silan- und/oder Phosphatmonomere erweitert. Darin unterscheiden sie sich klar von Adhäsiven die ausschließlich eine Methacrylatbasis aufweisen, wie beispielsweise One Coat Bond. Silane sind in der Lage Verbindungen zu anorganischen wie auch zu organischen Oberflächen zu bilden. Obwohl die alleinige Verwendung von Silanen bei der Reparatur von Kompositen nach wie vor in der Forschung unterschiedlich bewertet wird, ist ihre Anwendung in Verbindung mit entsprechenden Methoden der Oberflächenvorbehandlung, wie beispielsweise mit dem Cojet-

System, in Bezug auf die Reparaturfestigkeit oftmals als vielversprechend beschrieben worden [75-76]. Phosphat-Monomere wurden erstmals in Befestigungskompositen eingesetzt. Diese Phosphatmonomere enthalten polymerisierbare funktionelle Gruppen, die mit Bestandteilen der Matrix von kunststoffbasierten Kompositen, Adhäsiven oder Zementen polymerisieren können [77]. Hochvernetzte vorpolymerisierte Komposite finden auch Verwendung bei herausnehmbaren Zahnersatz als Material für Prothesenzähne. Auch sie weisen einen hohen Konversionsgrad und wenig freie C-C-Doppelbindungen an ihrer Oberfläche auf [78]. visio.link wird vom Hersteller zur Oberflächenkonditionierung von Prothesenzähnen, zur Optimierung des Verbundes zur Prothesenbasis empfohlen.

Als Reparaturkomposite kamen das Mikro-Hybridkomposit Arabesk Top sowie das Nano-Hybridkomposit GrandioSO zur Anwendung. Durch die höhere Relation von Oberfläche und Volumen der Füllkörper in einem Nano-Hybridkomposit neigen einige Vertreter dieser Kompositgruppe zu einer erhöhten Wasseraufnahme. Nach der Lagerung in Wasser beeinflusst dieser Faktor die mechanischen Eigenschaften einiger Nano-Hybridkomposite, im Vergleich zu den Mikro-Hybridkompositen, negativ [78].

Sowohl Mikro-Hybridkomposite als auch Nano-Hybridkomposite werden von Ferracane et al. als Universal-Komposite bezeichnet und können in allen Belastungsbereichen der Mundhöhle angewendet werden [79].

Alle in dieser Arbeit verwendeten Materialien wurden nach Herstellerangaben verarbeitet. Die Applikation aller Materialien, sowie alle vorbereitenden und nachfolgenden Arbeitsschritte wurden stets von derselben Person ausgeführt. Um die klinisch möglicherweise auftretende Situation der Kontamination der korundgestrahlten Oberfläche zu simulieren wurde ein Teil der Prüfkörper, welche mit dem Cojet-System bestrahlt wurden, für 10 Sekunden mit destilliertem Wasser besprüht. Neben der Methode des Korundstrahlens zur Oberflächenvorbehandlung, wurden die Auswirkungen des Aufrauhens der Oberfläche mit einem Siliziumkarbid-Schleifer auf die Reparaturfestigkeit untersucht. Mit dem Siliziumkarbid-Schleifer wurde die zu behandelnde Oberfläche bei 10000 Umdrehungen pro Minute aufgeraut.

Die Oberflächenvorbehandlungen bei Kompositreparaturen sollen einerseits zu einem Aufrauen der Oberfläche, und damit einer Oberflächenvergrößerung und besseren Benetzbarkeit durch einen Haftvermittler, führen, andererseits die altersbedingte Degradationsschicht der Substratoberfläche entfernen.

Ein wichtiger Aspekt dieser Studie war es den Einfluß von Phosphorsäure auf die

Reparaturfestigkeit zu untersuchen. Aus diesem Grund erfuhr die Hälfte der Prüfkörper vor der Konditionierung eine Behandlung mit 34%iger Phosphorsäure. Die Phosphorsäure wurde für 30 s auf die Substrate appliziert und gleichmäßig verteilt und nach dieser Zeit für nochmals 30 s mit destilliertem Wasser gereinigt. Obwohl Phosphorsäure nicht in der Lage ist Mikroretentionen auf der Oberfläche zu erzeugen [81-82], besitzt sie einen oberflächlichen Reinigungseffekt. Debris und Schleifstaub können von der Oberfläche des Reparatursubstrates entfernt werden. Weiterhin vermag sie die Reaktivität zwischen silikatisierter Oberfläche und des Silan-Haftvermittlers zu steigern und dadurch die Zahl an Si-OH Gruppen auf der Silikatoberfläche zu erhöhen [41].

Eine ausreichende Benetzbarkeit der vorbehandelten Oberfläche ist alleine durch das Reparaturkomposit nicht gegeben [83]. Die Monomere des Haftvermittlers dringen in das durch die Oberflächenvorbehandlung entstandene mikroretentive Oberflächenrelief ein und hinterlassen nach der Lichtexposition eine unpolymerisierte Schicht, die eine Bindung zum aufgetragenen Reparaturkomposit ermöglicht [69].

Die verwendete LED-Lampe wurde nach jedem Polymerisationsvorgang auf Verunreinigungen überprüft. Es wurde überprüft ob die zuvor gemessene Irradianz von 1176 mW/cm² [83], im entsprechenden Modus, gegeben war. Um einen Einfluß des Pigmentgehaltes auf die Polymerisation auszuschließen wiesen beide verwendeten Reparaturkomposite die Farbe A2 auf.

Vankerhoven et al. stellten fest, dass sich, nach der Alterung von Restaurationen und deren Politur, der Gehalt an unbesetzten Doppelbindungen, die für den Verbund der darauffolgenden Kompositschicht essentiell sind, stark verringert [56]. Die Lagerung in destilliertem Wasser bei 37 °C, das Kochen in Wasser, das Bad in Zitronensäure [40], die Lagerung in künstlichem Speichel oder Alkohol, [84] sowie das Thermowechselbad [55], sollten das intraorale Milieu widerspiegeln sowie die Alterungsbedingungen in der Mundhöhle nachahmen.

Die Lagerung in destilliertem Wasser bei 37 °C simuliert das durchschnittliche Mundhöhlenmilieu, wenn keine unterschiedlich temperierten Speisen und Getränke aufgenommen werden. Durch diese Stimulation wird den hygroskopischen Komponenten der Prüfkörper die Möglichkeit der Wassereinlagerung und damit verbundenen Veränderung ihrer Eigenschaften gegeben [85].

In dieser Studie wurde die Proben nach der Reparatur für 24 Stunden in destilliertem Wasser gelagert um ihnen Zeit zur Nachpolymerisation zu geben.

Der Effekt von Wasser auf kunststoffbasierte Komposite wird für eine Verschlechterung ihrer mechanischen Eigenschaften, der durch die Degradation des Silanverbundes von Füllern und Matrix hervorgerufen wird verantwortlich gemacht. Das Ausmaß, zu welchem Komposite durch die wasserbedingte Degradation beeinflusst werden, scheint je nach Zusammensetzung unterschiedlich

zu sein. Jedoch werden durch die Flüssigkeitsaufnahme und das Herauslösen von Komponenten, wie Füllkörpern oder unreaktierten Monomeren, die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Kompositen signifikant beeinflusst. Obwohl die klinischen Daten den hydrolytischen und hygroskopischen Effekten an dem Scheitern von Kompositrestaurationen nicht die größte Bedeutung zumessen, so ist die intraorale Langzeitstabilität von Kompositrestaurationen ein wichtiges Anliegen, da Sekundärkaries den Hauptgrund für die Erneuerung von zahnärztlichen Restaurationen darstellt.

Ziel der thermischen Ermüdung mittels Thermowechselbad ist es, die thermische Belastung der Verbundfläche durch den Flüssigkeitseinfluss und die Temperaturwechsel darzustellen, wofür in dieser Studie Temperaturwechsel von 5 °C auf 55 °C gewählt wurden. Der Wechsel zwischen den beiden temperierten Bädern fand alle 20 s statt, wodurch ein thermischer Ermüdungsprozess an der Verbundfläche zwischen Substrat und Reparaturkomposit erzielt wurde. Die Alterung im Thermowechselbad erzeugt Spannungen, welche auf die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Materialien, die an der Reparatur beteiligt sind, hervorgerufen werden. Dies könnte zu einem Scheitern des Verbundes führen [86]. Wasseraufnahme während der Alterung im Thermowechselbad hat einen schädlichen Einfluß auf die strukturelle und physikalische Integrität des Komposites, und damit die Reparaturfestigkeit, die auf hydrolytische Degradation zurückzuführen ist [87]. Diese tritt während des Prozesses der Oxidation und/oder der Hydrolyse auf. Die fortschreitende Degradation der Mikrostruktur zeigt sich in der Ausbildung von Poren, in welche sich Oligomere, verbliebene Monomere und Produkte der Degradation sowie Additive einlagern [66].

Rinastiti et al. zeigten zusätzlich, dass wiederholte Temperaturwechsel zu einer kontinuierlichen Schwächung der Verbundes von Kunststoffmatrix und Füllkörpern führt, was auch auf die hydrolytische Degradation der, die Füllkörper umgebenden Silanschicht, sowie einem Quellen der Kunststoffmatrix zurückzuführen sei. Lagerung in Wasser sowie die thermische Alterung in Thermowechselbädern zeigen einen signifikanten Einfluss auf die Verbundfestigkeit der Kompositreparaturen [55].

Die Zahl der Forschungsarbeiten, die einen Zugversuch zur Bestimmung der Reparaturfestigkeit heranziehen, wird von der Anzahl an Studien die hierzu einen Scherversuch nutzen übertroffen [14]. Insgesamt stellen die Anwendung des Scherversuchs und des Mikrozugtests die zwei häufigsten Verfahren dar. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Testverfahren zur Bestimmung der Reparaturstärke ist leider nicht zu ziehen, da die Resultate oft nicht miteinander in Einklang zu bringen sind [14]. Den Einfluß der verschiedenen Testverfahren auf die Verbundstärke verschiedener Adhäsive zu Dentin zu erörtern, versuchten Scherrer et al. [88]. Insgesamt lies sich

der Trend zu niedrigeren Verbundstärken bei den Makrotestverfahren mit Verbundflächen um 7 mm² bei den Scher- und Zugversuchen, als bei ihren korrespondierenden Mikro-Tests mit einer Verbundfläche von circa 1 mm² beobachten. Dies zeigt, dass mit abnehmender Verbundfläche die gemessenen Verbundstärken stiegen. Der direkte Vergleich von Zugtest und Mikrozugtest zeigte für alle verwendeten Adhäsive zwei- bis fünffach höhere Werte. Durchschnittlich wurden in den einbezogenen Studien für die Schertests höhere Werte erreicht als für Zugtests. Beim direkten Vergleich dieser beiden Testverfahren muss beachtet werden, dass es große Unterschiede in der Streßverteilung an der Verbundfläche durch die Variation an Substratgeometrie, Lastverteilung und dem Elastizitätsmodul der verwendeten Materialien gibt. Die Unterschiede in den gemessenen Werten versuchte man durch die Finite-Elemente-Methode zu erklären. Der Varianzeffekt der Testverfahren befand sich im Mikrozugversuch zwischen 22 % und 49 %, im Zugversuch zwischen 20 % und 53 %, im Scherversuch zwischen 24 % und 45 %. Der hohe Varianzeffekt in den Studien in denen Scherversuche durchgeführt wurden, wird unter anderem dadurch erklärt, dass im Scherversuch eine uneinheitliche Stressverteilung innerhalb der Verbundfläche vorliegt, welcher einen signifikanten Einfluß auf die Versagensart besitzt. Mithilfe der Finite-Element-Analyse konnte gezeigt werden, dass komplexe Stressmomente an der Verbundfläche durch die Biegemomente während des Scherversuches hervorgerufen werden. Dies führt zu Rissen, welche sich ins Substrat fortsetzen. Die gemessenen Werte, welche aus der frakturierten Substratoberfläche gewonnen werden, enthalten somit Aspekte der kohäsiven Fraktur des Substrates und/oder des Reparaturmaterials und spiegeln somit eine Mischung aus den mechanischen Eigenschaften der getesteten Materialien wieder, sind aber in Bezug auf die Eignung des Adhäsivs wenig aussagekräftig. Der hohe Varianzkoeffizient des Zugversuches sollte mit der Entwicklung des Mikrozugtestes verringert werden, da durch die kleinere Verbundfläche versucht werden sollte verfälschende Einflüsse zu reduzieren. Der direkte Vergleich zwischen Zug- und Mikrozugversuch konnte aber keinen kleineren Varianzkoeffizienten aufzeigen. Trotz ähnlicher Substratherstellung und Übereinstimmung der Versuche, blieben die Ergebnisse streuend, unabhängig davon welches Testverfahren gewählt wurde. [88]

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Materialverluste oder kleine Frakturen des industriell polymerisierten CAD/CAM-Komposites die durch Verschleiß während der klinischen Tragezeit vorkommen können, müssen reparierbar sein.

Deswegen ist es unabdingbar einen zufriedenstellenden Verbund zwischen dem CAD/CAM-Komposit und des Reparaturkomposites herzustellen.

In dieser Studie wurde untersucht ob die Verbundfestigkeit zu dem CAD/CAM-Komposit durch gewisse Oberflächenvorbehandlungen und die zusätzliche Applikation eines Adhäsivsystems gesteigert werden kann.

Mechanische Vorbehandlung bewirkt neben der Reinigung der Oberfläche eine Vergrößerung derselben. Dies resultiert in einer höheren Haftung, welche auf die mechanische Retention zurückzuführen ist [89].

Alle Oberflächenvorbehandlungen, die in dieser Studie angewandt wurden, Korundstrahlen und die Bearbeitung mit einem Siliziumkarbid-Schleife, resultierten in einer Oberflächenvergrößerung welche eine mechanische Retention verursachte. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass mit der Oberflächenvorbehandlung des Cojet Systems eine signifikant höhere Reparaturfestigkeit erreicht werden konnte als die Oberflächenvorbehandlung mit dem Siliziumkarbid-Schleifer. Es kann daher angenommen werden, dass Korundstrahlen mit 3 bar Druck in einer höheren mechanischen Retention resultiert als eine Oberflächenvorbehandlung mit einem Siliziumkarbid-Schleifer. Folglich führt die Oberflächenvorbehandlung mit dem Cojet-System also auch zu einem besseren Verbund. Deshalb kann die erste Hypothese, nämlich, dass die Oberflächenvorbehandlung keinen Einfluß auf den Verbund hat, zurückgewiesen werden.

Dies steht in Einklang mit anderen Forschungsarbeiten. In der Studie von Rinastiti et al. erreichten alle mit silikatisiertem Aluminiumoxid bestrahlten Gruppen höhere Reparaturfestigkeiten. Neben höheren Oberflächenrauigkeiten, die eine mikroretentive Verankerung für einen Haftvermittler bieten und durch die Oberflächenvergrößerung auch eine höhere Verbundfläche schaffen, zeigte sich während des Korundstrahlens ein Abtrag von kontaminierten Schichten. Die Substratoberfläche profitierte, durch die tribochemische Beschichtung, von einer höheren Oberflächenenergie und einer verbesserten Benetzbarkeit [55]. Die Verwendung des Cojet-Systems führte bei Brendeke et al. zu fast ausschließlich kohäsiven Frakturen und resultierte in hohen Reparaturfestigkeiten [42].

Durch das Korundstrahlen wird eine gleichmäßigere Oberflächentopografie, als beim Aufrauen mit einem Schleifkörper, geschaffen, die eine verbesserte Ausgangslage für die mechanische Retention schafft [54].

Jedoch kann nicht in jeder zahnärztlichen Praxis auf Korundstrahlgeräte zurückgegriffen werden, während die Anwendung eines Siliziumkarbid-Schleifers schnell und einfach ist. Obwohl die Reparaturfestigkeiten bei der Oberflächenvorbehandlung mit einem Siliziumcarbid-Schleifer signifikant niedriger sind als jene durch Korundstrahlen, sind die Werte immer noch signifikant höher als diejenigen ohne Oberflächenvorbehandlung. Dadurch wird diese Methode der Oberflächenvorbehandlung zu einer Reparaturalternative, denn eine Oberflächenvorbehandlung sollte in jedem Fall durchgeführt werden.

Die Resultate dieser Studie zeigen außerdem, dass die Oberflächenkonditionierung des zu reparierenden Substrates mit einem Haftvermittler notwendig ist um einen signifikant verbesserten Verbund zwischen dem CAD/CAM-Komposit und dem Reparaturkomposit zu erreichen. Folglich ist eine mikromechanische Retention alleine nicht ausreichend um eine suffiziente Haftung zwischen den beiden Materialien zu erreichen. CAD/CAM-Komposite sind industriell polymerisiert und weisen einen höheren Grad an Konversionen auf als konventionell polymerisierte Komposite [9].

Trotz des geringen Angebotes an ungesättigten C-C-Doppelbindungen bietet die Anwendung eines Adhäsivsystems als Haftvermittler eine signifikant verbesserte Haftkraft. Die Effizienz der analysierten Haftvermittler war unterschiedlich. Die Universalreparaturadhäsive (visio.link, Scotchbond Universal and Futurabond U) schnitten besser ab als die Adhäsive, welche nur eine Methacrylatbasis aufweisen (One Coat Bond). Die Unterschiede in der Effektivität der verschiedenen Adhäsive sollte zumindest teilweise auf die Unterschiede in der Zusammensetzung der Adhäsive und deren Anteil an funktionellen Monomeren begründet sein. Universalreparaturadhäsive wie beispielsweise Scotchbond Universal und Futurabond U enthalten zusätzlich zu den regulären Methacrylatmonomeren, Silane oder Phosphatmonomere. Diese Tatsache lässt eine signifikante Rolle der Silan- oder Phosphatmonomere auf die Haftkraft vermuten, da es diese ermöglichen an die anorganischen Anteile des CAD/CAM-Komposites, das aus Nanokeramik-Partikeln besteht, welche in eine Kunststoffmatrix eingebettet sind. Circa 80 Gewichtsprozent der chemischen Zusammensetzung des CAD/CAM-Komposites bestehen aus Nanokeramik Partikeln (Silikat Nanomere mit 20 nm Durchmesser und Zirkon Nanomere mit 4-11 nm Durchmesser). Dies bestätigt die Effizienz der Reparaturadhäsive bei dem Verbund zu Zirkon wenn es sandgestrahlt wurde [15]. Nach tribochemischen Beschichtung sinkt der Wasserkontaktwinkel durch die vergrößerte Oberflächenrauigkeit und einem vermehrten Angebot an exponiertem Silizium auf der Oberfläche. Silane adsorbieren an die Füllkörper und verbessern die Oberflächenbenetzbarkeit, was eine verbesserte Penetration der Reparaturmaterialien in die mikromechanischen Porositäten des vorbehandelten Substrates mit sich bringt [55].

Haftvermittler mit 10-Methacryloyloxydecyl Dihydrogenphosphat (MDP) Monomeren wurden mit Erfolg verwendet, um den Verbund von Kompositen und Zirkon zu verbessern [90-94]. Die Phosphatestergruppe des MDP-Monomers bindet chemisch zu Zirkonoxid [90] [95].

visio.link und Scotchbond Universal erreichten vergleichbare Haftkräfte, die beide höher waren als die für Futurabond U gemessenen. Obwohl die chemischen Zusammensetzungen von Scotchbond Universal und Futurabond U vergleichbar scheinen, ist der eben genannte Unterschied möglicherweise auf die unterschiedliche Menge an Monomeren zurückzuführen. Besonders bei HEMA, einem wasserlöslichen Monomer das OH-Ionen enthält und in beiden Adhäsiven vorhanden ist, wurde ein hoher Grad an Wasser der in der adhäsiven Schicht verblieben war, nachgewiesen. Dieser könnte die mechanischen Eigenschaften und den Haftverbund der Adhäsive ungünstig beeinflussen [96]. Da die Daten nach der künstlichen Alterung der Proben gewonnen wurden, könnten Unterschiede in Wasseraufnahme als eine Funktion der HEMA Menge bereits aufgetreten sein. Zusammenfassend konnte demonstriert werden dass die zusätzliche Applikation eines Adhäsivsystems zu einem stärkeren Verbund führt. Deshalb konnte die zweite Hypothese, nämlich dass eine zusätzliche Konditionierung der Substratoberfläche zu keiner erhöhten Reparaturfestigkeit führt, zurückgewiesen werden.

Die für die Reparatur in dieser Studie getesteten Kompositmaterialien, hatten einen geringen Einfluß auf die Zugfestigkeit. Dieser Einfluß war jedoch abhängig von der Oberflächenvorbehandlung und von der Reinigung mit Phosphorsäure. Die Reparaturkomposite unterschieden sich deutlich in ihren mechanischen Eigenschaften. Das Mikrohybrid-Komposit Arabesk Top zeigte ein deutlich geringeres Eindringmodul als das Nanohybrid-Komposit GrandioSO (16,09 GPa für Arabesk Top und 24,23 GPa für GrandioSO [83], gemessen nach künstlicher Alterung analog den reparierten Prüfkörper), entsprechend ihres Fülleranteils. (Tabelle 1) Ein Reparaturkomposit mit geringerer Viskosität mag einerseits eine bessere Benetzung der Oberfläche generieren, und damit weniger Defekte aufweisen, dürfte andererseits jedoch einer größeren Schrumpfung unterliegen. Diese aufgeführten Effekte sind widersprüchlich und erschweren eine umfassende Vorhersage eines finalen Effektes. In den mit CoJet korundgestrahlten Proben, wurde ein kleiner Vorteil beobachtet, wenn mit GrandioSo repariert wurde, während sich in den Gruppen die mit Siliziumkarbid-Schleifern bearbeitet wurden das Gegenteil, beziehungsweise kein Unterschied bei der Wahl des Reparaturkomposites in Erscheinung trat.

Boyer et al. beobachteten höhere Reparaturstärken bei der Verwendung von hochgefüllten Kompositen als Reparaturmaterial. Dies führte er auf deren höheres Elastizitätsmodul zurück. Bei

der Verwendung als Reparaturkomposit resultiert eine gleichmäßigere Verteilung der Belastung auf die Verbundfläche. Jedoch erreichten die Werte der mikrogefüllten Komposite in der Studie bei Verwendung eines Haftvermittlers bessere Reparaturstärken, was Boyer et al. auf die bessere Adaptation durch die mikrogefüllten Komposite zurückführten. Chan und Boyer widmeten sich auch dem Einfluß des Matrixtyps auf die Kompositreparatur. Gemäß ihrer Studie, zeigten die mit Kompositen unterschiedlichen Matrixtyps durchgeführten Reparaturen im Mittel Werte um 70 % der Kohäsivkraft einer nicht reparierten Restauration. Die gemessenen Werte unterschieden zwar in Bezug auf das verwendete Substrat, sie wurden aber nicht von der Wahl des Reparaturmaterials beeinflusst. [94] Dies bestätigten Mitsaki-Matsou et al. im Jahr 1991. Gemäß ihrer Studie konnte kein statistisch relevanter Einfluß des Reparaturmaterials nachgewiesen werden. [95] Baur und Ilie verglichen die Reparatur von sechs kunststoffbasierten Kompositen mit unterschiedlicher Matrix und unterschiedlichen Füllstoffen. Die Materialien wurden untereinander kombiniert. Nach Evaluation der Ergebnisse zeigte sich, dass die Wahl des Reparaturkomposites keinen entscheidenden Einfluß auf die Reparaturfestigkeit aufwies. [85]

In dieser Studie wurden die reparierten Proben einer künstlichen Alterung zugeführt, die aus einer thermischen Alterung für 10.000 Zyklen zwischen 5 °C und 55 °C mit einer Verweildauer von 20 s in den einzelnen Bädern bestand. Thermische Alterung kann die Zugfestigkeit auf zweierlei Weisen beeinflussen. Einerseits kann die mechanische Belastung durch volumetrische Änderungen, sich auf die Verbundfläche in Form von Rissen auswirken und zu niedrigeren Haftwerten führen. [96] Andererseits könnte die Temperaturerhöhung zu einer verstärkten Post-Polymerisation der Verbundfläche und damit zu einer höheren Haftkraft führen. [97] Da in dieser Studie die Prüfkörper gealtert wurden nachdem sie für 24 Stunden bei 37 °C in destilliertem Wasser Zeit für eine Nachpolymerisation hatten, kann die letzte Annahme bestätigt werden. Desweiteren wurde in mehreren Studien beschrieben, dass intraorale Temperaturwechsel bei alltäglichen Tätigkeiten wie Essen und Trinken sowie beim Atmen auftauchen. [98] Zur Zeit gibt es kein systematisches standardisiertes Procedere zur vollständigen Nachahmung von in vitro-Testmethoden im Labor. Trotzdem bietet die künstliche thermische Alterung im Labor eine gewisse standardisierte und reproduzierbare Belastung aller Prüfkörper. Aufgrund der hohen Anzahl an Zyklen im Rahmen der thermischen Alterung in dieser Studie kann man annehmen, dass der Alterungsprozess dem unter klinischen Bedingungen ähnelt.

7. Schlußfolgerungen

Die Untersuchungen ergaben folgendes:

- Das Korundstrahlen der Substratoberflächen des CAD/CAM-Komposites führt zu höheren Zugfestigkeiten im Vergleich zur Vorbehandlung mit einem Siliziumcarbid-Schleifer vor der Reparatur
- Die getesteten Adhäsive stellten sich als effiziente Universaladhäsive zur Reparatur der gealterten CAD/CAM-Komposit Substrate heraus, wobei visio.link und Scotchbond Universal etwas besser abschnitten als Futurabond U.
- Die Reinigung der vorbehandelten Oberfläche mit Phosphorsäure beeinflusste die Reparaturfestigkeit nicht signifikant
- Die Wahl des Reparaturkomposites hatte keinen entscheidenden Einfluß auf die Reparaturfestigkeit
- Eine Wasserkontamination der korundgestrahlten Oberfläche beeinflusste die Zugfestigkeit nicht signifikant.

8. Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde der Effekt diverser Oberflächenvorbehandlungen, wie Korundstrahlen und das Bearbeiten der Oberfläche mit einem Siliziumcarbidschleifer, das Reinigen der Oberfläche mit Phosphorsäure sowie die Konditionierung der Oberfläche mit unterschiedlichen Haftvermittlern auf die Reparaturfestigkeit von zwei verschiedenen Reparaturkompositen und dem CAD/CAM-Komposit Lava Ultimate untersucht. Weiterhin sollte geklärt werden, ob eine Wasserkontamination der korundgestrahlten Substratoberfläche die Reparaturfestigkeit negativ beeinflusst.

Generell führte das Korundstrahlen zu einer suffizienten Reparaturfestigkeit. Durchschnittlich war diese höher als bei Reparaturen, denen eine Oberflächenvorbehandlung mit dem Siliziumcarbidschleifer vorausging. Diese Methode kann folglich zur Oberflächenvorbehandlung des CAD/CAM-Komposites empfohlen werden. Das intraorale Korundstrahlen setzt allerdings eine entsprechende Gerätschaft voraus, die nicht in jeder zahnärztlichen Praxis vorhanden ist, und mit Kosten verbunden ist. Die Reparaturfestigkeiten, welche bei Verwendung des Siliziumcarbidschleifers erreicht wurden, waren signifikant höher als diejenigen bei denen keine Oberflächenvorbehandlung stattfand. Daher stellt diese Art der Oberflächenvorbehandlung eine kostengünstige und empfehlenswerte Alternative für die Praxis dar. Die Wahl des Reparaturkomposites hatte ebenso wie die Kontamination mit Wasser und Phosphorsäure keinen signifikanten Einfluß auf die Reparaturfestigkeit. Die in dieser Studie getesteten Haftvermittler führten zu einer suffizienten Reparatur, die Verwendung der Universaladhäsive Scotchbond Universal und visio.link führte zu etwas besseren Ergebnissen als die Applikation von Futurabond U.

Obwohl diese in-vitro Studie nicht alle intraoralen individuellen Variationen nachahmen kann, gibt sie Hinweise auf den verlässlichen Verbund von CAD/CAM-Komposit und Reparaturkompositen. Die in-vitro Tests zum Haftverbund evaluieren die Qualität der Adhäsion. Nachdem eine gewisse Reparaturtechnik die in-vitro Tests durchlaufen haben, sollte eine kontrollierte, standardisierte in-vivo-Test-Studie die klinische Langzeit-Tauglichkeit bestätigen.

9. Literaturverzeichnis

- [1] D. Edelhoff, F. Beuer, J. Schweiger, O. Brix, M. Stimmelmayer, und J.-F. Guth, „CAD/CAM-generated high-density polymer restorations for the pretreatment of complex cases: a case report“, *Quintessence Int. Berl. Ger.* 1985, Bd. 43, Nr. 6, S. 457–467, Juni 2012.
- [2] V. Alt, M. Hannig, B. Wöstmann, und M. Balkenhol, „Fracture strength of temporary fixed partial dentures: CAD/CAM versus directly fabricated restorations“, *Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater.*, Bd. 27, Nr. 4, S. 339–347, Apr. 2011.
- [3] E. Göncü Başaran, E. Ayna, P. K. Vallittu, und L. V. J. Lassila, „Load-bearing capacity of handmade and computer-aided design--computer-aided manufacturing-fabricated three-unit fixed dental prostheses of particulate filler composite“, *Acta Odontol. Scand.*, Bd. 69, Nr. 3, S. 144–150, Mai 2011.
- [4] B. Stawarczyk, M. Özcan, A. Trottmann, F. Schmutz, M. Roos, und C. Hämmerle, „Two-body wear rate of CAD/CAM resin blocks and their enamel antagonists“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 109, Nr. 5, S. 325–332, Mai 2013.
- [5] N. Krämer, K.-H. Kunzelmann, M. Taschner, A. Mehl, F. Garcia-Godoy, und R. Frankenberger, „Antagonist Enamel Wears More Than Ceramic Inlays“, *J. Dent. Res.*, Bd. 85, Nr. 12, S. 1097–1100, Jan. 2006.
- [6] A. Attia, K. M. Abdelaziz, S. Freitag, und M. Kern, „Fracture load of composite resin and feldspathic all-ceramic CAD/CAM crowns“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 95, Nr. 2, S. 117–123, Feb. 2006.
- [7] S. Vanoorbeek, K. Vandamme, I. Lijnen, und I. Naert, „Computer-aided designed/computer-assisted manufactured composite resin versus ceramic single-tooth restorations: a 3-year clinical study“, *Int. J. Prosthodont.*, Bd. 23, Nr. 3, S. 223–230, Juni 2010.
- [8] S. G. Pereira, R. Fulgêncio, T. G. Nunes, M. Toledano, R. Osorio, und R. M. Carvalho, „Effect of curing protocol on the polymerization of dual-cured resin cements“, *Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater.*, Bd. 26, Nr. 7, S. 710–718, Juli 2010.
- [9] B. Stawarczyk, T. Basler, A. Ender, M. Roos, M. Ozcan, und C. Hämmerle, „Effect of surface conditioning with airborne-particle abrasion on the tensile strength of polymeric CAD/CAM crowns luted with self-adhesive and conventional resin cements“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 107, Nr. 2, S. 94–101, Feb. 2012.
- [10] B. Stawarczyk, A. Trottmann, C. H. F. Hämmerle, und M. Özcan, „Adhesion of veneering resins to polymethylmethacrylate-based CAD/CAM polymers after various surface

- conditioning methods“, *Acta Odontol. Scand.*, Bd. 71, Nr. 5, S. 1142–1148, Sep. 2013.
- [11] R. Hickel, K. Brühaver, und N. Ilie, „Repair of restorations – Criteria for decision making and clinical recommendations“, *Dent. Mater.*, Bd. 29, Nr. 1, S. 28–50, Jan. 2013.
- [12] M. Amaral, R. Belli, P. F. Cesar, L. F. Valandro, A. Petschelt, und U. Lohbauer, „The potential of novel primers and universal adhesives to bond to zirconia“, *J. Dent.*, Bd. 42, Nr. 1, S. 90–98, Jan. 2014.
- [13] G. T. Rocca, F. Bonnafous, N. Rizcalla, und I. Krejci, „A technique to improve the esthetic aspects of CAD/CAM composite resin restorations“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 104, Nr. 4, S. 273–275, Okt. 2010.
- [14] R. Giordano, „Materials for chairside CAD/CAM–produced restorations“, *J. Am. Dent. Assoc.*, Bd. 137, Nr. suppl 1, S. 14S–21S, Jan. 2006.
- [15] T. Miyazaki, Y. Hotta, J. Kunii, S. Kuriyama, und Y. Tamaki, „A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience“, *Dent. Mater. J.*, Bd. 28, Nr. 1, S. 44–56, 2009.
- [16] L.-H. He und M. Swain, „A novel polymer infiltrated ceramic dental material“, *Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater.*, Bd. 27, Nr. 6, S. 527–534, Juni 2011.
- [17] J.-F. Güth, T. Zuch, S. Zwinge, J. Engels, M. Stimmelmayer, und D. Edelhoff, „Optical properties of manually and CAD/CAM-fabricated polymers“, *Dent. Mater. J.*, Bd. 32, Nr. 6, S. 865–871, Nov. 2013.
- [18] B. Stawarczyk, B. Sener, A. Trottmann, M. Roos, M. Ozcan, und C. H. F. Hämmerle, „Discoloration of manually fabricated resins and industrially fabricated CAD/CAM blocks versus glass-ceramic: effect of storage media, duration, and subsequent polishing“, *Dent. Mater. J.*, Bd. 31, Nr. 3, S. 377–383, 2012.
- [19] W. H. Mörmann, B. Stawarczyk, A. Ender, B. Sener, T. Attin, und A. Mehl, „Wear characteristics of current aesthetic dental restorative CAD/CAM materials: two-body wear, gloss retention, roughness and Martens hardness“, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, Bd. 20, S. 113–125, Apr. 2013.
- [20] C.-L. Lin, Y.-H. Chang, und P.-R. Liu, „Multi-factorial analysis of a cusp-replacing adhesive premolar restoration: A finite element study“, *J. Dent.*, Bd. 36, Nr. 3, S. 194–203, März 2008.
- [21] A. Coldea, M. V. Swain, und N. Thiel, „Mechanical properties of polymer-infiltrated-ceramic-network materials“, *Dent. Mater.*, Bd. 29, Nr. 4, S. 419–426, Apr. 2013.
- [22] Lava Ultimate Technisches Produktprofil, „multimedia.3m.com/mws/media/796312O/lava-ultimate-technisches-produktprofil-d.pdf?fn=5-Lava_Ultimate_TPP_Folder.pdf“. .
- [23] J.-F. Nguyen, V. Migonney, N. D. Ruse, und M. Sadoun, „Resin composite blocks via high-

- pressure high-temperature polymerization“, *Dent. Mater.*, Bd. 28, Nr. 5, S. 529–534, Mai 2012.
- [24] J. F. Nguyen, D. Ruse, A. C. Phan, und M. J. Sadoun, „High-temperature-pressure Polymerized Resin-infiltrated Ceramic Networks“, *J. Dent. Res.*, Bd. 93, Nr. 1, S. 62–67, Jan. 2014.
- [25] B. Stawarczyk, A. Ender, A. Trottman, M. Özcan, J. Fischer, und C. H. F. Hämmerle, „Load-bearing capacity of CAD/CAM milled polymeric three-unit fixed dental prostheses: effect of aging regimens“, *Clin. Oral Investig.*, Bd. 16, Nr. 6, S. 1669–1677, Dez. 2012.
- [26] M. Rosentritt, M. Behr, J. M. van der Zel, und A. J. Feilzer, „Approach for valuating the influence of laboratory simulation“, *Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater.*, Bd. 25, Nr. 3, S. 348–352, März 2009.
- [27] L. H. Mair, T. A. Stolarski, R. W. Vowles, und C. H. Lloyd, „Wear: mechanisms, manifestations and measurement. Report of a workshop“, *J. Dent.*, Bd. 24, Nr. 1–2, S. 141–148, Jan. 1996.
- [28] B. G. Smith, D. W. Bartlett, und N. D. Robb, „The prevalence, etiology and management of tooth wear in the United Kingdom“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 78, Nr. 4, S. 367–372, Okt. 1997.
- [29] S. D. Heintze, A. Cavalleri, M. Forjanic, G. Zellweger, und V. Rousson, „Wear of ceramic and antagonist—A systematic evaluation of influencing factors in vitro“, *Dent. Mater.*, Bd. 24, Nr. 4, S. 433–449, Apr. 2008.
- [30] P. Lambrechts, M. Braem, M. Vuylsteke-Wauters, und G. Vanherle, „Quantitative in vivo wear of human enamel“, *J. Dent. Res.*, Bd. 68, Nr. 12, S. 1752–1754, Dez. 1989.
- [31] G. E. Monasky und D. F. Taylor, „Studies on the wear of porcelain, enamel, and gold“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 25, Nr. 3, S. 299–306, März 1971.
- [32] V. Preis, M. Behr, C. Kolbeck, S. Hahnel, G. Handel, und M. Rosentritt, „Wear performance of substructure ceramics and veneering porcelains“, *Dent. Mater.*, Bd. 27, Nr. 8, S. 796–804, Aug. 2011.
- [33] I. Krejci, F. Lutz, M. Reimer, und J. L. Heinzmann, „Wear of ceramic inlays, their enamel antagonists, and luting cements“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 69, Nr. 4, S. 425–430, Apr. 1993.
- [34] A. Elmaria, G. Goldstein, T. Vijayaraghavan, R. Z. Legeros, und E. L. Hittelman, „An evaluation of wear when enamel is opposed by various ceramic materials and gold“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 96, Nr. 5, S. 345–353, Nov. 2006.
- [35] M. H. Ramp, L. C. Ramp, und S. Suzuki, „Vertical Height Loss: An Investigation of Four Restorative Materials Opposing Enamel“, *J. Prosthodont.*, Bd. 8, Nr. 4, S. 252–257, 1999.
- [36] D. C. Jagger und A. Harrison, „An in vitro investigation into the wear effects of unglazed,

- glazed, and polished porcelain on human enamel“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 72, Nr. 3, S. 320–323, Sep. 1994.
- [37] K. H. Kunzelmann, B. Jelen, A. Mehl, und R. Hickel, „Wear evaluation of MZ100 compared to ceramic CAD/CAM materials“, *Int. J. Comput. Dent.*, Bd. 4, Nr. 3, S. 171–184, Juli 2001.
- [38] T. Brosh, R. Pilo, N. Bichacho, und R. Blutstein, „Effect of combinations of surface treatments and bonding agents on the bond strength of repaired composites“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 77, Nr. 2, S. 122–126, Feb. 1997.
- [39] B. A. C. Loomans, M. Vivan Cardoso, F. J. M. Roeters, N. J. M. Opdam, J. De Munck, M. C. D. N. J. M. Huysmans, und B. Van Meerbeek, „Is there one optimal repair technique for all composites?“, *Dent. Mater.*, Bd. 27, Nr. 7, S. 701–709, Juli 2011.
- [40] J. Brendeke und M. Ozcan, „Effect of physicochemical aging conditions on the composite-composite repair bond strength“, *J. Adhes. Dent.*, Bd. 9, Nr. 4, S. 399–406, Aug. 2007.
- [41] A. U. Yap, C. W. Sau, und K. W. Lye, „Effects of aging on repair bond strengths of a polyacid-modified composite resin“, *Oper. Dent.*, Bd. 24, Nr. 6, S. 371–376, Dez. 1999.
- [42] W. A. Gregory, B. Pounder, und E. Bakus, „Bond strengths of chemically dissimilar repaired composite resins“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 64, Nr. 6, S. 664–668, Dez. 1990.
- [43] F. Papacchini, S. Dall’Oca, N. Chieffi, C. Goracci, F. T. Sadek, B. I. Suh, F. R. Tay, und M. Ferrari, „Composite-to-composite microtensile bond strength in the repair of a microfilled hybrid resin: effect of surface treatment and oxygen inhibition“, *J. Adhes. Dent.*, Bd. 9, Nr. 1, S. 25–31, Feb. 2007.
- [44] C. Shen, E. Mondragon, V. V. Gordan, und I. A. Mjör, „The effect of mechanical undercuts on the strength of composite repair“, *J. Am. Dent. Assoc.*, Bd. 135, Nr. 10, S. 1406–1412, Jan. 2004.
- [45] S. A. Shahdad und J. G. Kennedy, „Bond strength of repaired anterior composite resins: an it>/it> study“, *J. Dent.*, Bd. 26, Nr. 8, S. 685–694, Nov. 1998.
- [46] T. Brosh, R. Pilo, N. Bichacho, und R. Blutstein, „Effect of combinations of surface treatments and bonding agents on the bond strength of repaired composites“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 77, Nr. 2, S. 122–126, Feb. 1997.
- [47] T. Bonstein, D. Garlapo, J. Donarummo Jr, und P. J. Bush, „Evaluation of varied repair protocols applied to aged composite resin“, *J. Adhes. Dent.*, Bd. 7, Nr. 1, S. 41–49, 2005.
- [48] C. Yesilyurt, A. Kusgoz, M. Bayram, und M. Ulker, „Initial repair bond strength of a nano-filled hybrid resin: effect of surface treatments and bonding agents“, *J. Esthet. Restor. Dent. Off. Publ. Am. Acad. Esthet. Dent. Al*, Bd. 21, Nr. 4, S. 251–260, 2009.
- [49] R. Sun, N. Suansuwan, N. Kilpatrick, und M. Swain, „Characterisation of tribochemically

- assisted bonding of composite resin to porcelain and metal“, *J. Dent.*, Bd. 28, Nr. 6, S. 441–445, Aug. 2000.
- [50] M. R. Bouschlicher, J. W. Reinhardt, und M. A. Vargas, „Surface treatment techniques for resin composite repair“, *Am. J. Dent.*, Bd. 10, Nr. 6, S. 279–283, Dez. 1997.
- [51] C. Lucena-Martín, S. González-López, und J. M. Navajas-Rodríguez de Mondelo, „The effect of various surface treatments and bonding agents on the repaired strength of heat-treated composites“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 86, Nr. 5, S. 481–488, Nov. 2001.
- [52] S. A. R. Junior, J. L. Ferracane, und Á. D. Bona, „Influence of surface treatments on the bond strength of repaired resin composite restorative materials“, *Dent. Mater.*, Bd. 25, Nr. 4, S. 442–451, Apr. 2009.
- [53] M. Rinastiti, M. Özcan, W. Siswomihardjo, und H. J. Busscher, „Immediate repair bond strengths of microhybrid, nanohybrid and nanofilled composites after different surface treatments“, *J. Dent.*, Bd. 38, Nr. 1, S. 29–38, Jan. 2010.
- [54] H. Vankerckhoven, P. Lambrechts, M. van Beylen, C. L. Davidson, und G. Vanherle, „Unreacted methacrylate groups on the surfaces of composite resins“, *J. Dent. Res.*, Bd. 61, Nr. 6, S. 791–795, Juni 1982.
- [55] R. Frankenberger, N. Krämer, J. Ebert, U. Lohbauer, S. Käppel, S. ten Weges, und A. Petschelt, „Fatigue behavior of the resin-resin bond of partially replaced resin-based composite restorations“, *Am. J. Dent.*, Bd. 16, Nr. 1, S. 17–22, Feb. 2003.
- [56] A. Rathke, Y. Tymina, und B. Haller, „Effect of different surface treatments on the composite-composite repair bond strength“, *Clin. Oral Investig.*, Bd. 13, Nr. 3, S. 317–323, Sep. 2009.
- [57] B. A. C. Loomans, M. V. Cardoso, N. J. M. Opdam, F. J. M. Roeters, J. De Munck, M. C. D. N. J. M. Huysmans, und B. Van Meerbeek, „Surface roughness of etched composite resin in light of composite repair“, *J. Dent.*, Bd. 39, Nr. 7, S. 499–505, Juli 2011.
- [58] P. F. Cesar, P. M. Meyer Faara, R. Miwa Caldart, R. Gastaldoni Jaeger, und F. da Cunha Ribeiro, „Tensile bond strength of composite repairs on Artglass using different surface treatments“, *Am. J. Dent.*, Bd. 14, Nr. 6, S. 373–377, Dez. 2001.
- [59] H. G. Meeker, S. M. Hirsch, und J. M. Kaim, „Repairing voids at cavosurface-composite resin margins“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 50, Nr. 5, S. 636–638, Nov. 1983.
- [60] D. C. Crumpler, S. C. Bayne, S. Sockwell, D. Brunson, und T. M. Roberson, „Bonding to resurfaced posterior composites“, *Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater.*, Bd. 5, Nr. 6, S. 417–424, Nov. 1989.
- [61] E. J. Swift Jr, B. D. LeValley, und D. B. Boyer, „Evaluation of new methods for composite repair“, *Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater.*, Bd. 8, Nr. 6, S. 362–365, Nov. 1992.

- [62] S. Dall’oca, F. Papacchini, I. Radovic, A. Polimeni, und M. Ferrari, „Repair potential of a laboratory-processed nano-hybrid resin composite“, *J. Oral Sci.*, Bd. 50, Nr. 4, S. 403–412, Dez. 2008.
- [63] A. N. Cavalcanti, A. F. De Lima, A. R. Peris, F. H. O. Mitsui, und G. M. Marchi, „Effect of Surface Treatments and Bonding Agents on the Bond Strength of Repaired Composites“, *J. Esthet. Restor. Dent.*, Bd. 19, Nr. 2, S. 90–98, 2007.
- [64] J. L. Ferracane, „Elution of leachable components from composites“, *J. Oral Rehabil.*, Bd. 21, Nr. 4, S. 441–452, Juli 1994.
- [65] J. P. Matinlinna, L. V. J. Lassila, M. Ozcan, A. Yli-Urpo, und P. K. Vallittu, „An introduction to silanes and their clinical applications in dentistry“, *Int. J. Prosthodont.*, Bd. 17, Nr. 2, S. 155–164, Apr. 2004.
- [66] K. J. Söderholm und M. J. Roberts, „Variables influencing the repair strength of dental composites“, *Scand. J. Dent. Res.*, Bd. 99, Nr. 2, S. 173–180, Apr. 1991.
- [67] N. Hisamatsu, M. Atsuta, und H. Matsumura, „Effect of silane primers and unfilled resin bonding agents on repair bond strength of a prosthodontic microfilled composite“, *J. Oral Rehabil.*, Bd. 29, Nr. 7, S. 644–648, Juli 2002.
- [68] T. Brosh, N. Ferstand, H. Cardash, und H. Baharav, „Effect of polymerization under pressure on indirect tensile mechanical properties of light-polymerized composites“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 88, Nr. 4, S. 381–387, Okt. 2002.
- [69] N. Bähr, C. Keul, D. Edelhoff, M. Eichberger, M. Roos, W. Gernet, und B. Stawarczyk, „Effect of different adhesives combined with two resin composite cements on shear bond strength to polymeric CAD/CAM materials“, *Dent. Mater. J.*, Bd. 32, Nr. 3, S. 492–501, 2013.
- [70] A. Tezvergil, L. V. J. Lassila, und P. K. Vallittu, „Composite–composite repair bond strength: effect of different adhesion primers“, *J. Dent.*, Bd. 31, Nr. 8, S. 521–525, Nov. 2003.
- [71] T. T. Kallio, T. M. Lastumäki, und P. K. Vallittu, „Bonding of restorative and veneering composite resin to somepolymeric composites“, *Dent. Mater.*, Bd. 17, Nr. 1, S. 80–86, Jan. 2001.
- [72] C. H. Lloyd und V. B. Dhuru, „Effect of a commercial bonding agent upon the fracture toughness (K’Ic) of repaired heavily filled composite“, *Dent. Mater.*, Bd. 1, Nr. 3, S. 83–85, Juni 1985.
- [73] J.-F. Nguyen, V. Migonney, N. D. Ruse, und M. Sadoun, „Resin composite blocks via high-pressure high-temperature polymerization“, *Dent. Mater.*, Bd. 28, Nr. 5, S. 529–534, Mai 2012.
- [74] Papacchini F., Radovic I., Magni E., „Flowable composites as intermediate agents without

- adhesive application in resin composite repair.“, *Am. J. Dent.*, Bd. 21, Nr. 1, S. 53–58, Feb. 2008.
- [75] E. Nilsson, S. Alaeddin, S. Karlsson, P. Milleding, und A. Wennerberg, „Factors affecting the shear bond strength of bonded composite inlays“, *Int. J. Prosthodont.*, Bd. 13, Nr. 1, S. 52–58, Feb. 2000.
- [76] Chen, „Bonding of Resin Materials to All-Ceramics: A Review“, *Curr. Res. Dent.*, Bd. 3, Nr. 1, S. 7–17, Jan. 2012.
- [77] J. L. Cunningham, „Shear bond strength of resin teeth to heat-cured and light-cured denture base resin“, *J. Oral Rehabil.*, Bd. 27, Nr. 4, S. 312–316, 2000.
- [78] N. Ilie und R. Hickel, „Investigations on mechanical behaviour of dental composites“, *Clin. Oral Investig.*, Bd. 13, Nr. 4, S. 427–438, Dez. 2009.
- [79] J. L. Ferracane, „Resin composite—State of the art“, *Dent. Mater.*, Bd. 27, Nr. 1, S. 29–38, Jan. 2011.
- [80] U. Gbureck, A. Masten, J. Probst, und R. Thull, „Tribocchemical structuring and coating of implant metal surfaces with titanium oxide and hydroxyapatite layers“, *Mater. Sci. Eng. C*, Bd. 23, Nr. 3, S. 461–465, März 2003.
- [81] A. S. Fawzy, F. S. El-Askary, und M. A. Amer, „Effect of surface treatments on the tensile bond strength of repaired water-aged anterior restorative micro-fine hybrid resin composite“, *J. Dent.*, Bd. 36, Nr. 12, S. 969–976, Dez. 2008.
- [82] T. R. F. da Costa, A. M. Serrano, A. P. F. Atman, A. D. Loguercio, und A. Reis, „Durability of composite repair using different surface treatments“, *J. Dent.*, Bd. 40, Nr. 6, S. 513–521, Juni 2012.
- [83] B. Stawarczyk, A. Krawczuk, und N. Ilie, „Tensile bond strength of resin composite repair in vitro using different surface preparation conditionings to an aged CAD/CAM resin nanoceramic“, *Clin. Oral Investig.*, Bd. 19, Nr. 2, S. 299–308, März 2015.
- [84] H. Bauer und N. Ilie, „Effects of aging and irradiation time on the properties of a highly translucent resin-based composite“, *Dent. Mater. J.*, Bd. 32, Nr. 4, S. 592–599, 2013.
- [85] V. Baur und N. Ilie, „Repair of dental resin-based composites“, *Clin. Oral Investig.*, Bd. 17, Nr. 2, S. 601–608, März 2013.
- [86] G. A. Crim und F. Garcia-Godoy, „Microleakage: the effect of storage and cycling duration“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 57, Nr. 5, S. 574–576, Mai 1987.
- [87] K. J. Söderholm, M. Zigan, M. Ragan, W. Fischlschweiger, und M. Bergman, „Hydrolytic degradation of dental composites“, *J. Dent. Res.*, Bd. 63, Nr. 10, S. 1248–1254, Okt. 1984.
- [88] S. S. Scherrer, P. F. Cesar, und M. V. Swain, „Direct comparison of the bond strength results of

the different test methods: A critical literature review“, *Dent. Mater.*, Bd. 26, Nr. 2, S. e78–e93, Feb. 2010.

- [89] S. J. Marshall, S. C. Bayne, R. Baier, A. P. Tomsia, und G. W. Marshall, „A review of adhesion science“, *Dent. Mater. Off. Publ. Acad. Dent. Mater.*, Bd. 26, Nr. 2, S. e11–16, Feb. 2010.
- [90] M. Kern und V. P. Thompson, „Bonding to glass infiltrated alumina ceramic: Adhesive methods and their durability“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 73, Nr. 3, S. 240–249, März 1995.
- [91] G. M. D. de Souza, N. R. F. A. Silva, L. A. M. S. Paulillo, M. F. De Goes, E. D. Rekow, und V. P. Thompson, „Bond strength to high-crystalline content zirconia after different surface treatments“, *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.*, Bd. 93, Nr. 2, S. 318–323, Mai 2010.
- [92] K. Yoshida, K. Kamada, T. Sawase, und M. Atsuta, „Effect of three adhesive primers for a noble metal on the shear bond strengths of three resin cements“, *J. Oral Rehabil.*, Bd. 28, Nr. 1, S. 14–19, Jan. 2001.
- [93] J. De Munck, A. Arita, K. Shirai, K. L. Van Landuyt, E. Coutinho, A. Poitevin, M. Peumans, P. Lambrechts, und B. Van Meerbeek, „Microrotary fatigue resistance of a HEMA-free all-in-one adhesive bonded to dentin“, *J. Adhes. Dent.*, Bd. 9, Nr. 4, S. 373–379, Aug. 2007.
- [94] D. B. Boyer, K. C. Chan, und J. W. Reinhardt, „Build-up and repair of light-cured composites: bond strength“, *J. Dent. Res.*, Bd. 63, Nr. 10, S. 1241–1244, Okt. 1984.
- [95] H. Mitsaki-Matsou, A. Karanika-Kouma, Y. Papadoyiannis, und S. Theodoridou-Pahine, „An in vitro study of the tensile strength of composite resins repaired with the same or another composite resin“, *Quintessence Int. Berl. Ger. 1985*, Bd. 22, Nr. 6, S. 475–481, Juni 1991.
- [96] B. Torstenson und M. Brännström, „Contraction gap under composite resin restorations: effect of hygroscopic expansion and thermal stress“, *Oper. Dent.*, Bd. 13, Nr. 1, S. 24–31, 1988.
- [97] A. Piwowarczyk, H.-C. Lauer, und J. A. Sorensen, „In vitro shear bond strength of cementing agents to fixed prosthodontic restorative materials“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 92, Nr. 3, S. 265–273, Sep. 2004.
- [98] D. S. Palmer, M. T. Barco, und E. J. Billy, „Temperature extremes produced orally by hot and cold liquids“, *J. Prosthet. Dent.*, Bd. 67, Nr. 3, S. 325–327, März 1992.

10. Abkürzungsverzeichnis

Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
ANOVA	engl. Analysis of Variance, Varianzanalyse
Bis-EMA	bisphenol A polyethylene glycol diether dimethacrylat
BisGMA	bisphenol A diglycidylmethacrylat
CAD	computer-aided-design
CAM	computer-aided-manufacturing
CI	Confidence Intervall
DM	Dimethacrylate
et al	und andere
η_p	partielltes Eta-Quadrat
GPa	Gigapascal
HEDMA	Hydroxyethylmethacrylat
HEMA	2-hydroxyethyl methacrylate
μm	Mikrometer
MDP	10-methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphat
MPa	Megapascal
mm	Millimeter
mm/min	Millimeter pro Minute
mW/cm ²	Milliwatt pro Quadratzentimeter
OH	Hydroxylgruppe
RNC	Resin Nano-Ceramic
SD	engl. Standard deviation, Standardabweichung
Si	Silizium
SiO ₂	Siliziumdioxid
TEGDMA	triethyleneglycol dimethacrylat
UDMA	urethane dimethacrylat

11. Curriculum Vitae

Der Lebenslauf enthält private Daten, die nicht zur Veröffentlichung vorgesehen sind.

12. Danksagung

Ich möchte all denen danken, die das Zustandekommen dieser Arbeit ermöglicht haben, insbesondere meinen Eltern und meinem Bruder.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Nicoleta Ilie und PD Dr. Dipl.-Ing. (FH), MSc Bogna Stawarczyk für die Überlassung des interessanten Themas, die umfassende Betreuung und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Ohne ihre vielfältige Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Eidesstattliche Versicherung

Krawczuk, Andreas

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,

dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

Einfluß verschiedener intraoraler Reparaturmethoden auf die Reparaturfestigkeit eines industriell polymerisierten CAD/CAM-Komposites

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

Unterschleißheim

Ort, Datum

Unterschrift Doktorandin/Doktorand